

# Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

OBJECTIF A

RAPPORT FINAL V2

Modélisation Hydraulique et Logiciels

**Echirolles**

6 rue de Lorraine  
38130 ECHIROLLES  
Tel. : +33 (0)4 76 33 40 00  
Fax : +33 (0)4 76 33 42 96



## SOMMAIRE

<b>1. CONTEXTE ET OBJECTIFS</b>	<b>1</b>
1.1. CONTEXTE GENERAL	1
1.2. L'OBJECTIF A	2
1.3. L'ESTUAIRE DE LA SEINE	2
1.4. SYSTEME ALTIMETRIQUE	3
<b>2. RECUEIL DES DONNEES</b>	<b>4</b>
<b>3. ANALYSE DES EVENEMENTS HISTORIQUES</b>	<b>7</b>
3.1. INTRODUCTION	7
3.2. CRUES	7
3.2.1. Crues de la Seine	7
3.2.1.1. HISTORIQUE DES CRUES EN SEINE AVANT 1870	7
3.2.1.2. HISTORIQUE DES CRUES EN SEINE APRES 1870	8
3.2.1.3. EVENEMENT DE REFERENCE : 1910	9
3.2.2. Aménagements de la Seine	10
3.2.2.1. L'ESTUAIRE ET L'EMBOUCHURE DE LA SEINE	10
3.2.2.2. OUVRAGES DE POSES-AMFREVILLE	12
3.2.2.3. LES GRANDS LACS ET LA BASSEE	13
3.2.3. Les affluents	15
3.2.3.1. L'EURE	15
3.2.3.2. LA RISLE	16
3.2.4. Les effets des crues en aval de Poses : Rouen et Le Havre	16
3.2.5. Evénements maritimes	17
3.3. EVENEMENTS HISTORIQUES EN SEINE AVAL	18
3.3.1. Principes d'analyse	18
3.3.2. Evénements	19
3.4. ANALYSE DES EVENEMENTS HISTORIQUES	20
3.4.1. Caractérisation des événements	20
3.4.2. Evénements de 1658 – 1740 – 1810 et 1890	22
3.4.3. Evénement de 1910	24
3.4.3.1. DESCRIPTION	24
3.4.3.2. CARACTERISTIQUES HYDROMETEOROLOGIQUES	24
3.4.3.3. GRAPHIQUE DE SYNTHESE	25
3.4.4. Evénement de 1920	26
3.4.4.1. DESCRIPTION	26
3.4.4.2. CARACTERISTIQUES HYDROMETEOROLOGIQUES	26
3.4.4.3. GRAPHIQUE DE SYNTHESE	26
3.4.5. Evénement de 1955	27
3.4.5.1. DESCRIPTION	27
3.4.5.2. CARACTERISTIQUES HYDROMETEOROLOGIQUES	27
3.4.5.3. GRAPHIQUE DE SYNTHESE	28
3.4.6. Evénement de 1970	29
3.4.6.1. DESCRIPTION	29
3.4.6.2. CARACTERISTIQUES HYDROMETEOROLOGIQUES	29
3.4.6.3. GRAPHIQUE DE SYNTHESE	30
3.4.7. Evénement de 1990	31
3.4.7.1. DESCRIPTION	31
3.4.7.2. CARACTERISTIQUES HYDROMETEOROLOGIQUES	31
3.4.7.3. GRAPHIQUE DE SYNTHESE	32
3.4.8. Evénement de 1995	33
3.4.8.1. DESCRIPTION	33
3.4.8.2. CARACTERISTIQUES HYDROMETEOROLOGIQUES	33
3.4.8.3. GRAPHIQUE DE SYNTHESE	33
3.4.9. Evénements de 1999	34
3.4.9.1. DESCRIPTION	34
3.4.9.2. CARACTERISTIQUES HYDROMETEOROLOGIQUES	34
3.4.9.3. GRAPHIQUE DE SYNTHESE	35

# Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

3.4.10.	<b>Evénement de 2001</b>	<b>36</b>
3.4.10.1.	DESCRIPTION	36
3.4.10.2.	CARACTERISTIQUES HYDROMETEOROLOGIQUES	36
3.4.10.3.	GRAPHIQUE DE SYNTHESE	37
3.4.11.	<b>Evénement de 2004</b>	<b>38</b>
3.4.11.1.	DESCRIPTION	38
3.4.11.2.	CARACTERISTIQUES HYDROMETEOROLOGIQUES	38
3.4.11.3.	GRAPHIQUE DE SYNTHESE	38
3.4.12.	<b>Evénement de 2008</b>	<b>40</b>
3.4.12.1.	DESCRIPTION	40
3.4.12.2.	CARACTERISTIQUES HYDROMETEOROLOGIQUES	40
3.4.12.3.	GRAPHIQUE DE SYNTHESE	41
3.4.13.	<b>Evénement de 2010</b>	<b>42</b>
3.4.13.1.	DESCRIPTION	42
3.4.13.2.	CARACTERISTIQUES HYDROMETEOROLOGIQUES	42
3.4.13.3.	GRAPHIQUE DE SYNTHESE	43
3.4.14.	<b>Conclusion</b>	<b>44</b>
<b>4.</b>	<b>ANALYSES STATISTIQUES</b>	<b>45</b>
<b>4.1.</b>	<b>ANALYSES STATISTIQUES DES FORCAGES</b>	<b>45</b>
4.1.1.	<b>Débits aux stations limnimétriques</b>	<b>45</b>
4.1.1.1.	ANALYSE HYDROLOGIQUE	45
4.1.1.2.	ESTIMATION DES PERIODES DE RETOUR DES EVENEMENTS REFERENCES	48
4.1.2.	<b>Coefficients de marée</b>	<b>49</b>
4.1.3.	<b>Niveaux extrêmes et surcotes océaniques</b>	<b>50</b>
4.1.4.	<b>Pression Atmosphérique</b>	<b>51</b>
4.1.5.	<b>Vent</b>	<b>52</b>
4.1.5.1.	PARTICULARITE DES STATIONS	52
4.1.5.2.	ROSES DES VENTS	53
4.1.5.3.	CARACTERISTIQUES DES VENTS	53
4.1.5.4.	ANALYSE STATISTIQUE DU VENT AU CAP DE LA HEVE	55
4.1.5.5.	RELATION VENT-PRESSION	56
4.1.6.	<b>Apports de nappes</b>	<b>58</b>
4.1.6.1.	CARACTERISTIQUES DE LA NAPPE DE LA CRAIE	58
4.1.6.2.	DONNEES ADES	59
4.1.6.3.	BILAN A GRANDE ECHELLE	61
<b>4.2.</b>	<b>ANALYSES STATISTIQUES DES NIVEAUX</b>	<b>63</b>
4.2.1.	<b>Principes d'analyse</b>	<b>63</b>
4.2.2.	<b>Analyse de l'influence du vent par modélisation</b>	<b>64</b>
4.2.3.	<b>Elaboration de lois de comportement lié au vent par la modélisation</b>	<b>66</b>
4.2.4.	<b>Marégraphe du Havre (Balise A)</b>	<b>67</b>
4.2.4.1.	CONTRIBUTION DE LA MAREE	69
4.2.4.2.	CONTRIBUTION DU DEBIT DE LA SEINE	71
4.2.4.3.	CONTRIBUTION DE LA PRESSION ATMOSPHERIQUE	72
4.2.4.4.	CONTRIBUTION DU VENT	73
4.2.4.5.	CONTRIBUTION DU VENT – DONNEES DETAILLEES SUR 2010	74
4.2.4.6.	ANALYSE DU RESIDU	75
4.2.4.7.	CONCLUSION	76
4.2.5.	<b>Marégraphe de Rouen</b>	<b>77</b>
4.2.5.1.	ANALYSE STATISTIQUE DIRECTE DES NIVEAUX	77
4.2.5.2.	CONTRIBUTION DE LA MAREE ET DES DEBITS DE LA SEINE	78
4.2.5.3.	CONTRIBUTION DE LA PRESSION ATMOSPHERIQUE	81
4.2.5.4.	CONTRIBUTION DU VENT – MESURES	83
4.2.5.5.	CONTRIBUTION DU VENT – MODELE NUMERIQUE	84
4.2.5.6.	ANALYSE DU RESIDU	85
4.2.5.7.	CONCLUSION	87
4.2.6.	<b>Marégraphe de Tancarville</b>	<b>87</b>
4.2.6.1.	ANALYSE STATISTIQUE DIRECTE DES NIVEAUX	87
4.2.6.2.	CONTRIBUTION DE LA MAREE ET DES DEBITS DE LA SEINE	88
4.2.6.3.	CONTRIBUTION DE LA PRESSION ATMOSPHERIQUE	89
4.2.6.4.	CONTRIBUTION DU VENT – MESURES	90
4.2.6.5.	CONTRIBUTION DU VENT – MODELE NUMERIQUE	92
4.2.6.6.	ANALYSE DU RESIDU	93
4.2.6.7.	RELATION DES SURCOTES MARINES TANCARVILLE-LE HAVRE	93
4.2.6.8.	CONCLUSION	95
4.2.7.	<b>Marégraphe de Heurteauville</b>	<b>95</b>
4.2.7.1.	ANALYSE STATISTIQUE DIRECTE DES NIVEAUX	95
4.2.7.2.	CONTRIBUTION DE LA MAREE ET DES DEBITS DE LA SEINE	96
4.2.7.3.	CONTRIBUTION DE LA PRESSION ATMOSPHERIQUE	97

# Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

4.2.7.4.	CONTRIBUTION DU VENT – MESURES	98
4.2.7.5.	CONTRIBUTION DU VENT – MODELE NUMERIQUE	99
4.2.7.6.	ANALYSE DU RESIDU	100
4.2.7.7.	CONCLUSION	101
<b>4.2.8.</b>	<b>Marégraphe de Elbeuf</b>	<b>101</b>
4.2.8.1.	ANALYSE STATISTIQUE DIRECTE DES NIVEAUX	101
4.2.8.2.	CONTRIBUTION DE LA MAREE ET DES DEBITS DE LA SEINE	102
4.2.8.3.	RELATION AVEC LE BASSIN DE L'EURE	103
4.2.8.4.	CONTRIBUTION DE LA PRESSION ATMOSPHERIQUE	105
4.2.8.5.	CONTRIBUTION DU VENT – MESURES	106
4.2.8.6.	CONTRIBUTION DU VENT – MODELE NUMERIQUE	107
4.2.8.7.	ANALYSE DU RESIDU	108
4.2.8.8.	CONCLUSION	109
<b>4.2.9.</b>	<b>Eléments complémentaires sur l'influence du vent</b>	<b>110</b>
<b>4.3.</b>	<b>SYNTHESE SUR LES LOIS DE COMPORTEMENT</b>	<b>112</b>
4.3.1.	Le Havre	112
4.3.2.	Rouen	112
4.3.3.	Tancarville	113
4.3.4.	Heurteauville	113
4.3.5.	Elbeuf	113
<b>5.</b>	<b>OCCURRENCE DES COMBINAISONS CRITIQUES D'EVENEMENTS</b>	<b>114</b>
<b>5.1.</b>	<b>SYNTHESE DES RESULTATS OBTENUS</b>	<b>114</b>
5.1.1.	Facteurs primaires	114
5.1.2.	Statistiques	115
5.1.2.1.	SECTEUR LE HAVRE (BALISE A)	115
5.1.2.2.	SECTEUR TANCARVILLE	115
5.1.2.3.	SECTEUR HEURTEAUVILLE	116
5.1.2.4.	SECTEUR ROUEN	116
5.1.2.5.	SECTEUR ELBEUF	117
5.1.3.	Lignes d'eau	118
5.1.3.1.	LIGNES D'EAU DECENNALES	118
5.1.3.2.	LIGNES D'EAU CENTENNALES	119
5.1.3.3.	LIGNES D'EAU CINQ-CENTENNALES	120
<b>5.2.</b>	<b>COMBINAISON D'EVENEMENTS</b>	<b>121</b>
5.2.1.	Principe méthodologique de la combinaison d'événements appliqué à la surcote $S_{M,Q}$	121
5.2.2.	Principe méthodologique de la combinaison d'événements appliqué aux niveaux Z et Z(M,Q)	122
5.2.3.	Reconstruction de la ligne d'eau de fréquence centennale	124
<b>5.3.</b>	<b>PROPOSITION DE SCENARIOS POUR UNE LIGNE D'EAU CENTENNALE</b>	<b>127</b>
5.3.1.	Scénarios « en conditions actuelles » (SCA)	127
5.3.2.	Scénarios « Impact changement climatique » ou « Elévation du niveau marin » (SCC)	128
5.3.3.	Scénarios « Aménagements » (SAM)	129
<b>6.</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>130</b>
<b>ANNEXE 1</b>	<b>Rose des vents</b>	<b>132</b>
<b>ANNEXE 2</b>	<b>Profils le long de l'estuaire des surcotes liées au vent calculées par modélisation</b>	<b>133</b>

# Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

## FIGURES

FIG. 1.	ZONE D'ETUDE	2
FIG. 2.	LOCALISATION DES DONNEES DE VENTS	4
FIG. 3.	SYNOPTIQUE DE LA MESURE DE VENT ENTRE 1986 ET 2013 (SOURCE : METEO FRANCE)	5
FIG. 4.	SYNOPTIQUE DE LA MESURE DE VENT ENTRE 2005 ET 2012 (SOURCE : AIR NORMAND)	5
FIG. 5.	LOCALISATION DES MAREGRAPHES	6
FIG. 6.	PRINCIPALES CRUES REFERENCEES. EN HAUT A L'ECHELLE DU PONT D'AUSTERLITZ ENTRE 1872 ET 2001, EN BAS A MELUN ENTRE 1802 ET 2001 (HAUTEUR EN M)	9
FIG. 7.	AMENAGEMENTS REALISES DANS L'ESTUAIRE DE LA SEINE	11
FIG. 8.	AMENAGEMENTS REALISES DANS L'EMBOUCHURE DE LA SEINE	12
FIG. 9.	SCHEMA DU BARRAGE DE POSES	13
FIG. 10.	SCHEMA DES AMENAGEMENTS DES GRANDS LACS	14
FIG. 11.	NIVEAU EXTREMES REFERENCES A ROUEN ET AU HAVRE	17
FIG. 12.	NIVEAUX D'EAU MAXIMAUX LE LONG DE L'ESTUAIRE (DE POSES A HONFLEUR) POUR DIFFERENTS EVENEMENTS	21
FIG. 13.	NIVEAUX D'EAU MAXIMAUX LE LONG DE L'ESTUAIRE (DE POSES A HONFLEUR) POUR LES EVENEMENTS DE 1658, 1740, 1810, 1876 ET 1910	22
FIG. 14.	NIVEAUX D'EAU MAXIMAUX LE LONG DE L'ESTUAIRE (DE POSES A HONFLEUR) POUR L'EVENEMENT DE 1910	25
FIG. 15.	NIVEAUX D'EAU MAXIMAUX LE LONG DE L'ESTUAIRE (DE POSES A HONFLEUR) POUR L'EVENEMENT DE 1920	26
FIG. 16.	NIVEAUX D'EAU MAXIMAUX LE LONG DE L'ESTUAIRE (DE POSES A HONFLEUR) POUR L'EVENEMENT DE 1955	28
FIG. 17.	NIVEAUX D'EAU MAXIMAUX LE LONG DE L'ESTUAIRE (DE POSES A HONFLEUR) POUR L'EVENEMENT DE 1970	30
FIG. 18.	CONDITIONS METEOROLOGIQUES AU PORT D'ANTIFER (LE HAVRE) LORS L'EVENEMENT DE 1990 (SOURCE : CASPAR ET AL. - 2010)	31
FIG. 19.	NIVEAUX D'EAU MAXIMAUX LE LONG DE L'ESTUAIRE (DE POSES A HONFLEUR) POUR L'EVENEMENT DE 1990	32
FIG. 20.	NIVEAUX D'EAUX MAXIMAUX LE LONG DE L'ESTUAIRE (DE POSES A HONFLEUR) POUR L'EVENEMENT DE 1995	33
FIG. 21.	NIVEAUX D'EAU MAXIMAUX LE LONG DE L'ESTUAIRE (DE POSES A HONFLEUR) POUR LES EVENEMENTS DE 1999	35
FIG. 22.	NIVEAUX D'EAU MAXIMAUX LE LONG DE L'ESTUAIRE (DE POSES A HONFLEUR) POUR L'EVENEMENT DE 2001	37
FIG. 23.	NIVEAUX D'EAU MAXIMAUX LE LONG DE L'ESTUAIRE (DE POSES A HONFLEUR) POUR L'EVENEMENT DE 2004	38
FIG. 24.	MAREE ET SURCOTE AU HAVRE PENDANT L'EVENEMENT DE 2008	40
FIG. 25.	NIVEAUX D'EAU MAXIMAUX LE LONG DE L'ESTUAIRE (DE POSES A HONFLEUR) POUR L'EVENEMENT DE 2008	41
FIG. 26.	NIVEAUX D'EAU MAXIMAUX LE LONG DE L'ESTUAIRE (DE POSES A HONFLEUR) POUR L'EVENEMENT DE 2010	43
FIG. 27.	TYPE D'EVENEMENTS	44
FIG. 28.	AJUSTEMENTS DES DEBITS DE LA SEINE A PARIS AUSTERLITZ	46
FIG. 29.	CORRELATION EQUI-FREQUENCE DEBIT POSES VS DEBIT PARIS	47
FIG. 30.	AJUSTEMENTS DES DEBITS DE LA SEINE A POSES	47
FIG. 31.	REPARTITION STATISTIQUE DES COEFFICIENTS DE MAREE	49
FIG. 32.	STATISTIQUES DES NIVEAUX AU HAVRE, SHOM 2012 (A GAUCHE PERIODE DE RETOUR DES HAUTEURS OBSERVEES ; A DROITE PERIODE DE RETOUR DES SURCOTES)	50
FIG. 33.	LOI DE GUMBEL DE LA VARIATION DE PRESSION ATMOSPHERIQUE. A GAUCHE LES VALEURS NEGATIVES (DEPRESSION), A DROITE LES VALEURS POSITIVES (SURPRESSION)	51
FIG. 34.	POSITION DES STATIONS METEOROLOGIQUES DE L'ETUDE GLOBOCEAN, 2012	52
FIG. 35.	ROSES DES VENTS AUX 7 STATIONS	53
FIG. 36.	PROFIL EN LONG DES VENTS MOYENS - AMPLITUDES	54
FIG. 37.	PROFIL EN LONG DES VENTS MOYENS - DIRECTIONS	54
FIG. 38.	GRAPHE DE GUMBEL DE L'AMPLITUDE DU VENT AU CAP DE LA HEVE	55
FIG. 39.	GRAPHE DE GUMBEL DE L'AMPLITUDE DU VENT AU CAP DE LA HEVE, COMPLETE PAR DES DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES	56
FIG. 40.	RELATION PRESSION AU HAVRE – INTENSITE DU VENT AU CAP DE LA HEVE	57
FIG. 41.	RELATION GRADIENT TEMPOREL DE LA PRESSION AU HAVRE – INTENSITE DU VENT AU CAP DE LA HEVE	57
FIG. 42.	TRANSFORMEE DE FOURIER DES SIGNAUX DE VENT (A GAUCHE) ET DE PRESSION (A DROITE)	58
FIG. 43.	CARTE DES POINTS PIEZOMETRIQUE DU RESEAU ADES (RECTANGLES)	59
FIG. 44.	ENREGISTREMENTS DES NIVEAUX DES PIEZOMETRES SUR LE SECTEUR DE L'EURE ET DE LA RISLE - DEBITS DE LA SEINE ET DE L'EURE	60
FIG. 45.	ENREGISTREMENTS DES NIVEAUX DES PIEZOMETRES SUR LE SECTEUR DE LA RISLE ET DU CAILLY	60

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

FIG. 46.	A (A GAUCHE) : EVOLUTION DE L'IMPORTANCE DU DEBIT DES APPORTS LATERAUX TOTAUX (LIGNE BLEUE CONTINUE) ET DU DEBIT DE LA SEINE MESURE A POSES (LIGNE NOIRE CONTINUE) DE 1999 A 2008 ; B (A DROITE) : IMPORTANCE RELATIVE DU DEBIT DES APPORTS LATERAUX TOTAUX PAR RAPPORT AU DEBIT DE LA SEINE MESURE A POSES DE 1999 A 2008. EN POINTILLES LA VALEUR MINIMALE ET MOYENNE DU RAPPORT APPORTS LATERAUX/SEINE, MASSEI ET FRITIER 2010	61
FIG. 47.	CARTE DES APPORTS HYDROLOGIQUES EN SITUATION DE HAUT NIVEAU PIEZOMETRIQUE	62
FIG. 48.	PROFILS EN LONG DES SCENARIOS REPRESENTATIFS DES VARIATIONS DE VENT (AMPLITUDE A GAUCHE, DIRECTIONS A DROITE)	64
FIG. 49.	INFLUENCE DE LA DIRECTION DU VENT SUR LA LIGNE D'EAU PAR MODELISATION	65
FIG. 50.	INFLUENCE DE L'INTENSITE DU VENT SUR LA LIGNE D'EAU PAR MODELISATION	66
FIG. 51.	PICS DES NIVEAUX PAR MAREE A LA BALISE A – LE HAVRE	68
FIG. 52.	DISTRIBUTION PROBABILISTE DES NIVEAUX AU HAVRE. EN HAUT (A) SUR LA BASE DES DONNEES MAREGRAPHIQUES SEULES, EN BAS (B) EN INCORPORANT LES EVENEMENTS EXTREMES	69
FIG. 53.	BALISE A – LE HAVRE : PAR MAREE, PICS DES NIVEAUX, PIC DU SIGNAL DE MAREE ET SURCOTE (NIVEAUX EN CMH)	71
FIG. 54.	BALISE A – LE HAVRE : GRAPHIQUE Q-Z DES CORRELATIONS SURCOTE ET DEBIT DE LA SEINE	72
FIG. 55.	BALISE A – LE HAVRE : GRAPHIQUE S- $\Delta$ PA DES CORRELATIONS SURCOTE ET PRESSION ATMOSPHERIQUE (A GAUCHE SM, A DROITE SPA)	72
FIG. 56.	BALISE A – LE HAVRE : COMPARAISON DES SURCOTES SM ET DES SURCOTES RETRANCHEES DU SIGNAL DE LA PRESSION ATMOSPHERIQUE SPA	73
FIG. 57.	BALISE A – LE HAVRE : GRAPHIQUE S-V DES CORRELATIONS SURCOTE SPA ET AMPLITUDE DU VENT REDUIT A 10 M AU CAP DE LA HEVE	74
FIG. 58.	BALISE A : GRAPHIQUE S-V DES CORRELATIONS SURCOTE SPA ET AMPLITUDE DU VENT REDUIT A 10 M A QUEVILLY	75
FIG. 59.	BALISE A – LE HAVRE : DISTRIBUTION DU RESIDU ET LOI NORMALE	76
FIG. 60.	DISTRIBUTION PROBABILISTE DES NIVEAUX A ROUEN. EN HAUT (A) SUR LA BASE DES DONNEES MAREGRAPHIQUES SEULES, EN BAS (B) EN INCORPORANT LES EVENEMENTS EXTREMES	78
FIG. 61.	REFERENCES DANS LA BIBLIOGRAPHIE	79
FIG. 62.	VUE TRIDIMENSIONNELLE DE LA SURFACE DECRITE PAR LE TABL. 34 -	81
FIG. 63.	ROUEN : PAR MAREE, PICS DES NIVEAUX ET SURCOTE	82
FIG. 64.	ROUEN : GRAPHIQUE $S_{M,Q}/\Delta PA$ (A GAUCHE) ET $S_{PA}/\Delta PA$ (A DROITE) DES CORRELATIONS SURCOTE ET PRESSION ATMOSPHERIQUE A ROUEN	83
FIG. 65.	ROUEN : COMPARAISON DES SURCOTES $S_{M,Q}$ ET DES SURCOTES RETRANCHEES DU SIGNAL DE LA PRESSION ATMOSPHERIQUE $S_{PA}$	83
FIG. 66.	ROUEN : GRAPHIQUE S-V DES CORRELATIONS SURCOTE $S_{PA}$ ET AMPLITUDE DU VENT REDUIT A 10 M AU CAP DE LA HEVE	85
FIG. 67.	ROUEN : GRAPHIQUE S/V DES CORRELATIONS SURCOTE $S_{PA}$ ET AMPLITUDE DU VENT REDUIT A 10 M AU CAP DE LA HEVE – COMPARAISON DES COURBES DE TENDANCE (BLEU) ET DES RESULTATS DE LA MODELISATION POUR LE CAP DOMINANT (VIOLET)	86
FIG. 68.	ROUEN : DISTRIBUTION DU RESIDU ET LOI NORMALE	87
FIG. 69.	ROUEN : EVOLUTION TEMPORELLE DES 3 RESIDUS : $S_{M,Q}=Z-Z_{M,Q}$ ; $S_{PA}=Z_{M,Q}-Z_{PA}$ ; $RES=Z_{PA}-Z_V$ ET DEBIT MOYEN ANNUEL DE LA SEINE (VIOLET)	88
FIG. 70.	DISTRIBUTION PROBABILISTE DES NIVEAUX A TANCARVILLE SUR LA BASE DES DONNEES MAREGRAPHIQUES	90
FIG. 71.	TANCARVILLE : GRAPHIQUE $S_{M,Q}/\Delta PA$ (A GAUCHE) ET $S_{PA}/\Delta PA$ DES CORRELATIONS SURCOTE ET PRESSION ATMOSPHERIQUE	91
FIG. 72.	TANCARVILLE : GRAPHIQUE S/V DES CORRELATIONS SURCOTE $S_{PA}$ ET AMPLITUDE DU VENT REDUIT A 10 M AU CAP DE LA HEVE	92
FIG. 73.	TANCARVILLE : GRAPHIQUE S/V DES CORRELATIONS SURCOTE $S_{PA}$ ET AMPLITUDE DU VENT REDUIT A 10 M AU CAP DE LA HEVE. COMPARAISON DES COURBES DE TENDANCES ISSUE DES DONNEES (EN BLEU) ET ISSUE DE LA MODELISATION (EN VIOLET)	93
FIG. 74.	TANCARVILLE : DISTRIBUTION DU RESIDU ET LOI NORMALE	94
FIG. 75.	RELATION DES SURCOTES A TANCARVILLE ET DES SURCOTES AU HAVRE (BALISE A)	94
FIG. 76.	RELATION SURCOTE ESTUARIENNE A TANCARVILLE ET VENT AU CAP DE LA HEVE	96
FIG. 77.	DISTRIBUTION PROBABILISTE DES NIVEAUX A HEURTEAUVILLE SUR LA BASE DES DONNEES MAREGRAPHIQUES	97
FIG. 78.	HEURTEAUVILLE : GRAPHIQUE $S_{M,Q}/\Delta PA$ DES CORRELATIONS SURCOTE ET PRESSION ATMOSPHERIQUE	98
FIG. 79.	HEURTEAUVILLE : GRAPHIQUE S/V DES CORRELATIONS SURCOTE $S_{PA}$ ET AMPLITUDE DU VENT REDUIT A 10 M AU CAP DE LA HEVE	100
FIG. 80.	HEURTEAUVILLE : GRAPHIQUE S/V DES CORRELATIONS SURCOTE $S_{PA}$ ET AMPLITUDE DU VENT REDUIT A 10 M AU CAP DE LA HEVE. COMPARAISON DES COURBES DE TENDANCES ISSUE DES DONNEES (EN BLEU) ET ISSUE DE LA MODELISATION (EN VIOLET)	100
FIG. 81.	ELBEUF : DISTRIBUTION DU RESIDU ET LOI NORMALE	102
FIG. 82.	DISTRIBUTION PROBABILISTE DES NIVEAUX A ELBEUF SUR LA BASE DES DONNEES MAREGRAPHIQUES.	104
FIG. 83.	BASSIN DE L'EURE : NIVEAUX ET DEBITS DE LA SEINE PAR RAPPORT AUX NIVEAUX DE LA NAPPE ET DES DEBITS DE LA RIVIERE EURE	105
FIG. 84.	BASSIN DE L'EURE : NIVEAUX DE LA SEINE A ELBEUF ET NIVEAU DU PIEZOMETRE A MONTAURE	106
FIG. 85.	ELBEUF : GRAPHIQUE $S_{M,Q}/\Delta PA$ (A GAUCHE) ET $S_{PA}/\Delta PA$ DES CORRELATIONS SURCOTE ET PRESSION ATMOSPHERIQUE	107
FIG. 85.	ELBEUF : GRAPHIQUE S/V DES CORRELATIONS SURCOTE $S_{PA}$ ET AMPLITUDE DU VENT REDUIT A 10 M AU CAP DE LA HEVE	107

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

---

FIG. 86.	ELBEUF : GRAPHIQUE S/V DES CORRELATIONS SURCOTE $S_{PA}$ ET AMPLITUDE DU VENT REDUIT A 10 M AU CAP DE LA HEVE – COMPARAISON DES COURBES DE TENDANCE (BLEU) ET DES RESULTATS DE LA MODELISATION POUR LE CAP DOMINANT (VIOLET)	108
FIG. 87.	ELBEUF : DISTRIBUTION DU RESIDU ET LOI NORMALE	109
FIG. 88.	INFLUENCE DE L'INTENSITE DU VENT SUR LA LIGNE D'EAU – COMPARAISON MESURE/MODELE	110
FIG. 89.	LIGNES D'EAU DECENNALES LE LONG DE L'ESTUAIRE DES NIVEAUX ET SURCOTES LIES AUX FACTEURS PRIMAIRES ET RESIDU	118
FIG. 90.	LIGNES D'EAU CENTENNALE LE LONG DE L'ESTUAIRE DES NIVEAUX ET SURCOTES LIES AUX FACTEURS PRIMAIRES ET RESIDU.	119
FIG. 91.	LIGNES D'EAU CINQ-CENTENNALES LE LONG DE L'ESTUAIRE DES NIVEAUX ET SURCOTES LIES AUX FACTEURS PRIMAIRES ET RESIDU	120
FIG. 92.	ENSEMBLE DES COMBINAISONS CONDUISANT A UNE SURCOTE CENTENNALE POUR LES STATIONS HEURTEAUVILLE, ROUEN ET ELBEUF.	122
FIG. 93.	LIGNES D'EAU CENTENNALES POUR L'ENSEMBLE DES SURCOTES POSSIBLES	125
FIG. 94.	LIGNES D'EAU CENTENNALES POUR LES SURCOTES CENTENNALES (EN HAUT) ET LES SURCOTES FAIBLES $\leq 5$ ANS (EN BAS)	126
FIG. 95.	EVOLUTION DU NIVEAU MOYEN (1992-2001)	128

# Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

## TABLEAUX

TABL. 1 - CARACTERISTIQUES DES 4 GRANDS LACS	14
TABL. 2 - PRINCIPAUX AFFLUENTS – DONNEES BANQUE HYDRO	15
TABL. 3 - COTES A ROUEN ET AU HAVRE POUR LES DIFFERENTES CRUES REPERTORIEES	16
TABL. 4 - COTES A ROUEN ET AU HAVRE POUR LES EVENEMENTS MARITIMES REPERTORIES	17
TABL. 5 - RECAPITULATIF DES PRINCIPAUX EVENEMENTS HISTORIQUES	19
TABL. 6 - LISTE DES EVENEMENTS	20
TABL. 7 - CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES DE L'EVENEMENT DE 1910 – DEBITS ET NIVEAUX	24
TABL. 8 - CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES DE L'EVENEMENT DE 1920 – NIVEAUX	26
TABL. 9 - CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES DE L'EVENEMENT DE 1955 –NIVEAUX ET DEBITS	27
TABL. 10 - CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES DE L'EVENEMENT DE 1970 – NIVEAUX ET DEBITS	29
TABL. 11 - CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES DE L'EVENEMENT DE 1990 – NIVEAUX	31
TABL. 12 - CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES DE L'EVENEMENT DE 1995 – NIVEAUX	33
TABL. 13 - CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES DES EVENEMENTS DE 1999 – NIVEAUX	34
TABL. 14 - CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES DE L'EVENEMENT DE 2001 – NIVEAUX	36
TABL. 15 - CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES DE L'EVENEMENT DE 2004 – NIVEAUX	38
TABL. 16 - CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES DE L'EVENEMENT DE 2008 – NIVEAUX	40
TABL. 17 - CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES DE L'EVENEMENT DE 2010 – NIVEAUX	42
TABL. 18 - TABLEAU RECAPITULATIF DES TYPES D'EVENEMENTS SELON LES DATES	44
TABL. 19 - ANALYSE HYDROLOGIQUE DES DEBITS ANNUELS (M <sup>3</sup> /S)	45
TABL. 20 - DEBITS MESURES ET OCCURRENCE POUR LES EVENEMENTS HISTORIQUES (SEINE)	48
TABL. 21 - POURCENTAGES RELATIFS ET CUMULES D'APPARITION DES COEFFICIENTS DE MAREE	49
TABL. 22 - PERIODE DE RETOUR DES NIVEAUX EXTREMES ET DES SURCOTES A LA BALISE A (CM NGF)	51
TABL. 23 - STATISTIQUE DES MESURES DE PRESSION ATMOSPHERIQUE AU HAVRE	51
TABL. 24 - PERIODE DE RETOUR DES VARIATIONS DE PRESSION ATMOSPHERIQUE (MB)	52
TABL. 25 - PERIODE DE RETOUR DE L'INTENSITE DU VENT AU CAP DE LA HEVE – VENT MOYEN SUR 3H, REDUIT A 10M (M/S)	56
TABL. 26 - DONNEES DU RESEAU ADES	59
TABL. 27 - SCENARIOS DE VENTS MODELISES	65
TABL. 28 - SCENARIOS DE VENTS MODELISES	66
TABL. 29 - SURCOTES (CM), LIEES AUX VENTS, ET CALCULEES PAR LA MODELISATION	67
TABL. 30 - COMPOSANTES HARMONIQUES DE LA MAREE A LA BALISE A	69
TABL. 31 - BALISE A - ANALYSE DES SIGNAUX SPA ET SM	73
TABL. 32 - BALISE A - ANALYSE STATISTIQUE DES SIGNAUX SPA ET SV	74
TABL. 33 - BALISE A – STATISTIQUES DU SIGNAL RESIDU	75
TABL. 34 - ROUEN – VALEUR MOYENNE DES NIVEAUX EN FONCTION DES GAMMES DE DEBITS ET DES NIVEAUX DE LA MAREE AU HAVRE	79
TABL. 35 - ROUEN – VALEUR MOYENNE DE S <sub>M,Q</sub> DES NIVEAUX PAR RAPPORT A S <sub>M,Q</sub>	80
TABL. 36 - ROUEN – ECART TYPE DES NIVEAUX PAR RAPPORT A S <sub>M,Q</sub>	80
TABL. 37 - ROUEN – STATISTIQUES DE S <sub>M,Q</sub>	81
TABL. 38 - ROUEN - ANALYSE STATISTIQUE DES SIGNAUX SPA ET S <sub>M,Q</sub>	82
TABL. 39 - ROUEN - ANALYSE STATISTIQUE DES SIGNAUX SPA ET SV	84
TABL. 40 - ROUEN – SURCOTE LIEE AU GONFLEMENT DE L'ESTUAIRE PAR LE VENT DETERMINE PAR MODELISATION	84
TABL. 41 - COMPARAISON DES RESIDUS SV OBTENUE PAR ANALYSE DES DONNEES ET PAR MODELISATION SUR ROUEN	85
TABL. 42 - ROUEN – STATISTIQUES DE S <sub>M,Q</sub> PAR PERIODE TEMPORELLE	86
TABL. 43 - TANCARVILLE – VALEUR MOYENNE DES NIVEAUX EN FONCTION DES GAMMES DE DEBITS ET DES NIVEAUX DE LA MAREE AU HAVRE	88
TABL. 44 - TANCARVILLE – STATISTIQUES DE S <sub>M,Q</sub>	89
TABL. 45 - TANCARVILLE - ANALYSE STATISTIQUE DES SIGNAUX SPA ET S <sub>M,Q</sub>	90
TABL. 46 - TANCARVILLE - ANALYSE STATISTIQUE DES SIGNAUX SPA ET SV	91
TABL. 47 - TANCARVILLE – SURCOTE LIEE AU GONFLEMENT DE L'ESTUAIRE PAR LE VENT DETERMINE PAR MODELISATION	92
TABL. 48 - HEURTEAUVILLE – VALEUR MOYENNE DES NIVEAUX EN FONCTION DES GAMMES DE DEBITS ET DES NIVEAUX DE LA MAREE AU HAVRE	96
TABL. 49 - HEURTEAUVILLE – STATISTIQUES DE S <sub>M,Q</sub>	97
TABL. 50 - HEURTEAUVILLE - ANALYSE STATISTIQUE DES SIGNAUX SPA ET S <sub>M,Q</sub>	98
TABL. 51 - HEURTEAUVILLE - ANALYSE STATISTIQUE DES SIGNAUX SPA ET SV	99
TABL. 52 - HEURTEAUVILLE – SURCOTE LIEE AU GONFLEMENT DE L'ESTUAIRE PAR LE VENT DETERMINEE PAR MODELISATION	99
TABL. 53 - ELBEUF – VALEUR MOYENNE DES NIVEAUX EN FONCTION DES GAMMES DE DEBITS ET DES NIVEAUX DE LA MAREE AU HAVRE EN CM CMH	102
TABL. 54 - ELBEUF – STATISTIQUES DE S <sub>M,Q</sub>	103
TABL. 55 - ELBEUF - ANALYSE STATISTIQUE DES SIGNAUX SPA ET S <sub>M,Q</sub>	106
TABL. 56 - ELBEUF - ANALYSE STATISTIQUE DES SIGNAUX SPA ET SV	107
TABL. 57 - ELBEUF – SURCOTE LIEE AU GONFLEMENT DE L'ESTUAIRE PAR LE VENT, DETERMINEE PAR MODELISATION	108
TABL. 58 - COMPARAISON DES SURCOTES LIEES AU VENT EVALUEES PAR L'ANALYSE DES MESURES ET PAR MODELISATION	110



## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

---

TABL. 59 - PERIODE DE RETOUR DES NIVEAUX ET SURCOTES AU HAVRE (DECRIE PAR LE SHOM) ET DES FACTEURS PRIMAIRES Q, PA ET VENT	114
TABL. 60 - BALISE A – STATISTIQUES (BASEES SUR ETUDE SHOM)	115
TABL. 61 - TANCARVILLE – STATISTIQUES (EN CORRELANT LA SURCOTE A TANCARVILLE AVEC CELLE A LA BALISE A)	115
TABL. 62 - HEURTEAUVILLE – STATISTIQUES	116
TABL. 63 - ROUEN – STATISTIQUES	116
TABL. 64 - ELBEUF – STATISTIQUES	117
TABL. 65 - LISTE DES 24 COMBINAISONS DE PROBABILITE DES FACTEURS PRIMAIRES ET RESIDUS CONDUISANT A UNE SURCOTE CENTENNALE	121
TABL. 66 - COMBINAISONS DES PROBABILITES S(PA), S(V) ET RES CONDUISANT A UNE SURCOTE CENTENNALE	121
TABL. 67 - ROUEN – PROBABILITE D'OCCURRENCE D'EVENEMENTS FONCTION DU DEBIT DE LA SEINE ET DES NIVEAUX DE LA MAREE AU HAVRE (UNITES = ANNEES)	123
TABL. 68 - ROUEN – FREQUENCE DES NIVEAUX OBSERVES SELON LE DEBIT ET LE COEFFICIENT DES MAREES (CERTAINES VALEURS EXTREMES ONT ETE INTERPOLEES DU TABL. 34 - )	124

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

Ce document a été produit par Artelia Eau & Environnement.

Ce document a été préparé sous l'autorité du responsable de projet en accord avec le Directeur de Projet.

### Distribution

Index	ORGANISATION	DESTINATAIRE
1	GIPSA	C. FISSON
2	ARTELIA	F. GANDILHON

### Emission

4	Version finale V2	12/07/2013	E. David / F. Gandilhon	A. Masson
3	Version finale V1	27/06/2013	E. David / F. Gandilhon	A. Masson
2	Version provisoire complétée	29/05/2013	E. David / F. Gandilhon	A. Masson
1	Version provisoire	16/04/2013	E. David / F. Gandilhon	A. Masson
0	Version initiale préliminaire	12/04/2013	E. David / F. Gandilhon	A. Masson
<b>Indice</b>	<b>Objet de la modification</b>	<b>Date</b>	<b>Visa émetteur</b>	<b>Visa Qualité</b>

# 1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

## 1.1. CONTEXTE GENERAL

Les débordements de la Seine font partie de l'histoire du fleuve. Les archives dénombrent ainsi une soixantaine de crues majeures depuis le VI<sup>e</sup> siècle. En particulier, la crue de 1910 a fortement marqué l'imaginaire collectif et reste la référence actuellement utilisée pour la gestion du risque inondation en Seine. Plus récemment, des débordements plus ou moins importants de la Seine sont à noter en 1955, 1970, 1995, 1999, 2001, etc.

De nombreuses communes riveraines de l'estuaire de la Seine sont ainsi soumises au risque inondation, qu'il soit lié au ruissellement pluvial, à un débordement du fleuve ou de ses affluents, à une submersion marine ou aux remontées de nappe.

Selon le type d'inondation et le secteur géographique considéré, les facteurs mis en œuvre sont différents : hydrologie, marées astronomiques, événements météorologiques. Les plus hauts niveaux d'eau atteints correspondent en effet à la conjonction des différents paramètres : forts débits, grandes marées, vents d'ouest et faible pression atmosphérique. L'intensité de chacun de ces paramètres n'étant jamais identique, ceci confère à chaque inondation un caractère singulier.

Le risque inondation dans l'estuaire de la Seine doit donc être appréhendé à l'échelle globale de l'estuaire, et ce d'autant plus que cette problématique est au cœur de nombreux dispositifs réglementaires : Directive Inondation, Plans de Prévention des Risques Inondation, Etudes de Dangers des barrages et digues, dossiers au titre de la Loi sur l'Eau.

L'étude menée par ARTELIA Eau & Environnement vise à définir les niveaux d'eau à considérer pour la gestion du risque inondation et la détermination de leur période de retour. La présente mission est organisée autour de 4 objectifs :

- Objectif A : définition des périodes de retour des événements jouant un rôle dans les inondations,
- Objectif B : élaboration des scénarios pouvant déclencher les inondations, en combinant différents événements selon leur occurrence,
- Objectif C : développement et transfert d'un modèle hydraulique à l'échelle de l'estuaire de la Seine,
- Objectif D : modélisation de la ligne d'eau pour quelques-uns des scénarios préétablis.

**Le présent document constitue le rapport d'étape de l'objectif A.**

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

### 1.2. L'OBJECTIF A

L'objectif A de l'étude consiste à définir les périodes de retour des événements jouant un rôle dans les inondations de la Seine Aval.

Cette définition se base sur la connaissance approfondie des phénomènes hydrométéorologiques générateurs des plus hauts niveaux d'eau de la Seine, obtenue par exploitation des données disponibles et d'une version préliminaire du modèle hydrodynamique développé au cours de l'objectif C de la présente étude.

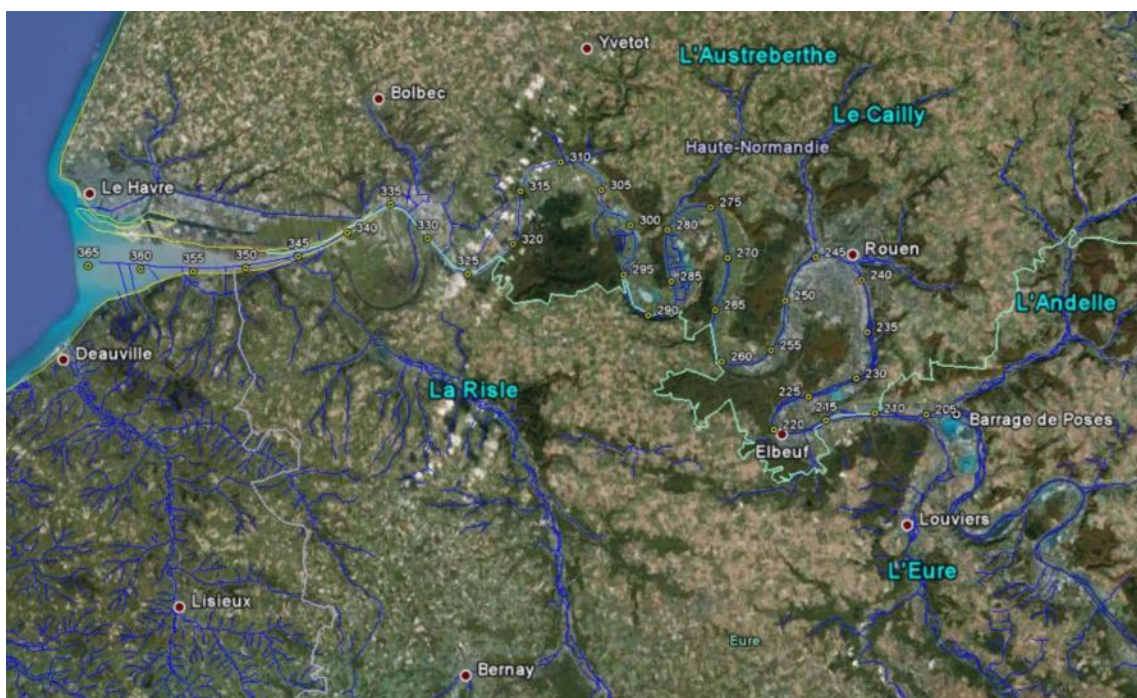
Cette étape se décompose en différents points :

- Analyse des événements historiques,
- Analyse statistiques des forçages et des niveaux observés,
- Evaluation des relations entre niveaux observés et forçage,
- Modélisation complémentaire de l'effet du vent sur la Seine.

L'analyse des événements historiques ayant généré des hauts niveaux d'eau dans l'estuaire se base dans un premier temps sur l'analyse des données recueillies.

### 1.3. L'ESTUAIRE DE LA SEINE

L'estuaire de la Seine, présenté sur la Fig. 1, s'étend du barrage de Poses en amont à la partie orientale de la Baie de Seine en aval soit environ 160 km de fleuve. Cette zone correspond à la zone d'influence de la marée dynamique. L'estuaire est composé du lit mineur de la Seine (zone où les écoulements apparaissent en dehors des événements hydrologiques exceptionnels et zone intertidale) séparé du lit majeur (plaine inondable) par les berges, de la frange littoral et de la zone maritime proche.



**Fig. 1. Zone d'étude**

Les deux pôles urbains de l'estuaire sont la communauté d'agglomération du Havre (17 communes – environ 250 000 habitants) et la communauté d'agglomération de Rouen, Elbeuf, Austreberthe (71 communes – environ 500 000 habitants).

Divers facteurs influencent l'hydrologie de l'estuaire :

- Le débit de la Seine,
- La marée,
- Les apports provenant des affluents, des écoulements souterrains et du ruissellement,
- Les paramètres météorologiques (vent, pression atmosphérique, pluies).

La combinaison de ces facteurs peut conduire à des événements hydrologiques extrêmes.

Depuis le XIX<sup>e</sup> siècle, de nombreux aménagements ont été réalisés au niveau de l'estuaire afin de maintenir ou de développer certaines activités (navigation, industries, tourisme, ...), ce qui a pour conséquence de modifier la morphologie du fleuve et donc les écoulements.

#### **1.4. SYSTEME ALTIMETRIQUE**

Deux systèmes altimétriques sont utilisés sur la zone d'étude : le Cote Marine Le Havre (CMH) et le NGF (Nivellement Général de la France). La correspondance entre ces systèmes est la suivante :

- Cote NGF = cote CMH – 4,38m (depuis 1969),
- Cote NGF = Cote CMH – 4,71 m (entre 1954 et 1968 compris),
- Cote NGF = Cote CMH – 4,835 m (avant 1954).

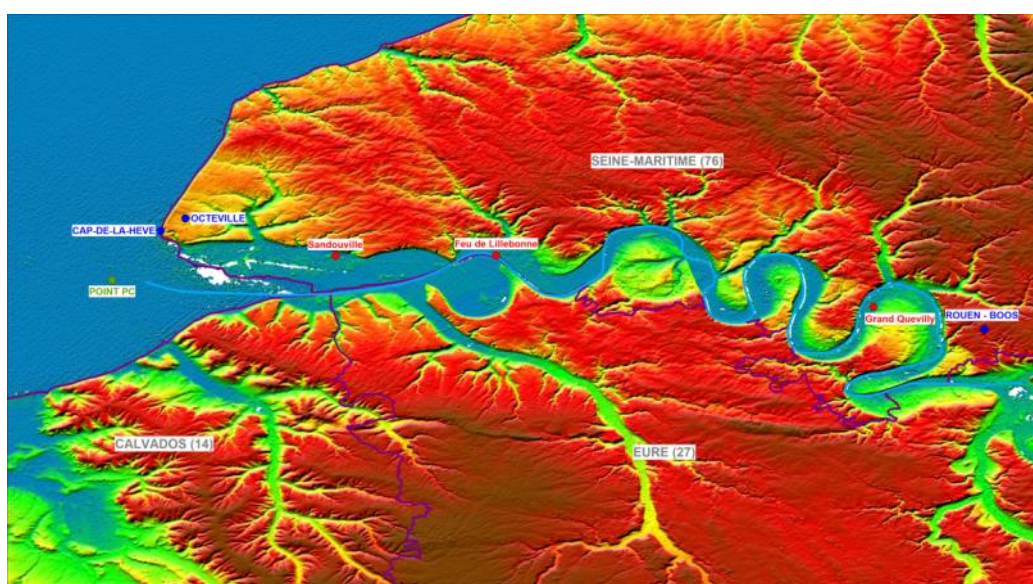
Le système CMH est retenu pour la présente étude.

## 2. RECUEIL DES DONNEES

Un certain nombre de données a été recueilli. En plus, des éléments bibliographiques référencés en fin de rapport, les données suivantes ont été utilisées pour cette phase d'étude :

### Vents et Pression Atmosphérique :

- Données de Pression Atmosphérique au Havre (Météo France, 1986 à 2013).
- Données horaires de Pression Atmosphérique au Havre de 2005 à 2012 (Source : Air Normand).
- Données de vents (cf. Fig. 2) :
  - Météo France (1986 à 2013 - Fig. 3) : Cap de la Hève (altitude/mer : 100m), Octeville (altitude/mer : 94m), Rouen - Boos (altitude/mer : 151m),
  - Air Normand (2005 à 2012 - Fig. 4) : Sandouville (altitude/mer : 6m), Feu de Lillebonne (altitude/mer : 5m), Grand Quevilly (altitude/mer : 8m).
  - Les paramètres horaires de vents de janvier 1992 à Décembre 2011 au point « PC » situé à l'entrée de l'embouchure de la Seine. Ces paramètres sont issus d'un travail de reconstitution des états de mers réalisé par GLOBOCEAN pour le compte d'ARTELIA en 2012.



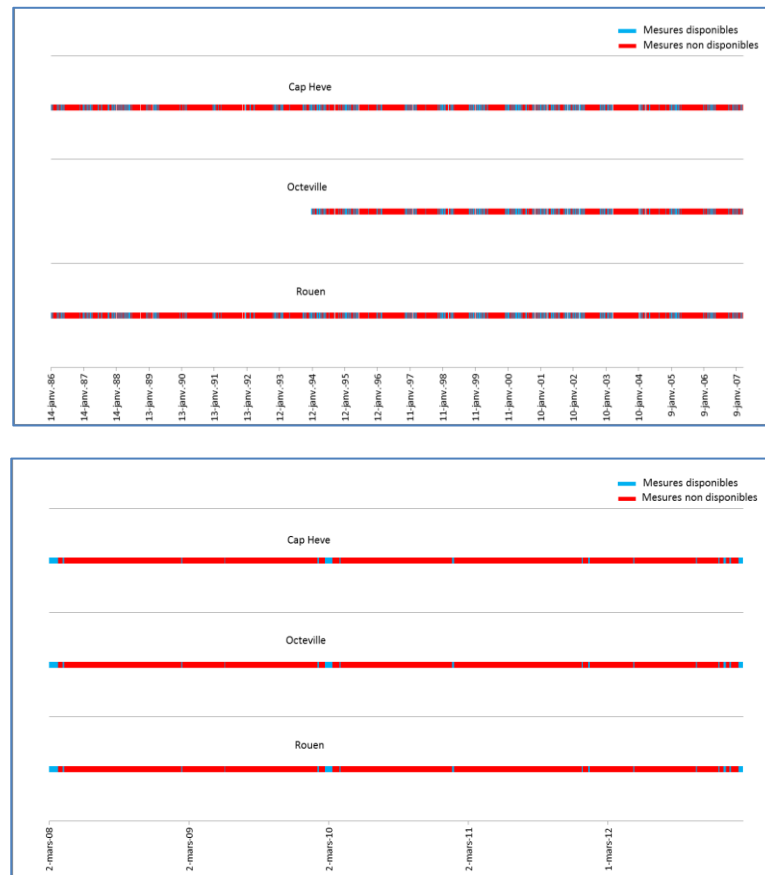
**Fig. 2. Localisation des données de vents**

Les synoptiques des mesures de vents (Fig. 3 et Fig. 4) montrent que les données de Météo France dont nous disposons (y compris la pression atmosphérique) sont ponctuelles et représentent au final moins de données que pour celles d'Air Normand qui sont disponibles cependant sur une période assez courte (7 ans).

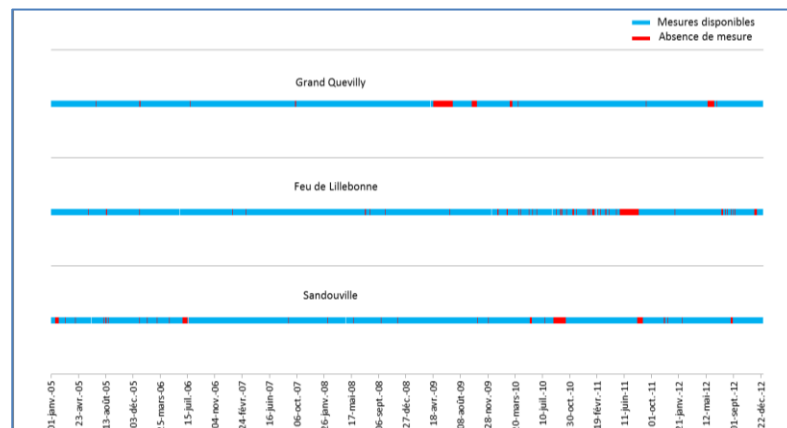
## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2



**Fig. 3. Synoptique de la mesure de vent entre 1986 et 2013 (Source : Météo France)**



**Fig. 4. Synoptique de la mesure de vent entre 2005 et 2012 (Source : Air Normand)**

### Débits :

Les données de débits sont issues de la Banque Hydro pour :

- La Seine : débits mesurés à Poses, Vernon et au pont d'Austerlitz,
- L'Eure (station : Louviers) et la Risle (station : Pont Anthou), en rive gauche,
- L'Andelle (station : Rouvray-Catillon), le Cailly (station : Notre Dame de Bondeville) et l'Austreberthe (station : Duclair), en rive droite.

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

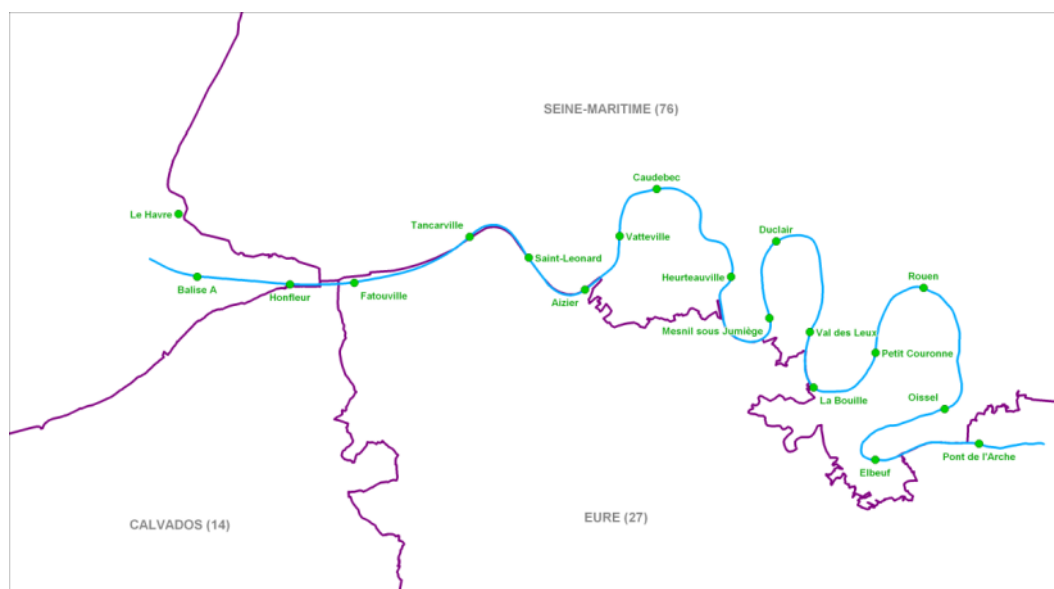
Objectif A

RAPPORT FINAL V2

- Données de débit à Poses entre 1941 et 2012 fournis par le GIP Seine Aval (certaines données sont manquantes en 1944 et 1945).

### Marées :

- Données de marées fournies par le Grand Port Maritime de Rouen :
  - Le signal de marée complet pour l'année 2010 pour les 17 marégraphes de l'estuaire (localisés sur la Fig. 5) ainsi que pour le marégraphe du Havre et la balise A,
  - L'historique du signal de marée « tronqué » (seuls les niveaux d'eau supérieurs au niveau moyen de chaque marégraphe) sur la période :
    - de 1985 à 2013 pour Rouen, Heurteauville, Caudebec, Vatteville, Honfleur et la Balise A,
    - de 1989 à 2013 pour Duclair, Mesnil sous Jumiège et Aizier, de 1988 à 2013 pour Tancarville,
    - de 1990 à 2013 pour La Bouille,
    - de 1993 à 2013 pour les marégraphes d'Elbeuf, d'Oissel, Petit Couronne, Val des Leux, Saint Léonard,
    - de 1996 à 2013 pour Fatouville,
    - de 2005 à 2010 au Havre.
- Extraction des coefficients de marée sur la période du 1/01/1985 au 31/12/2012 (Source : SHOM) ;
- Extraction des niveaux de pleine mer au Havre sur la période du 1/01/1985 au 31/12/2012 (Source : SHOM).
- Le recensement des niveaux d'eau historiques pour les crues et les tempêtes entre 1658 et 2010 (source : GIPSA).



**Fig. 5. Localisation des marégraphes**



**Nappe :**

- Analyse piézométrique déterminée par Massei N. et Fritier N, 2010.
- Données de 8 piézomètres issus du réseau ADES.

### **3. ANALYSE DES EVENEMENTS HISTORIQUES**

Ce chapitre a pour objectif de proposer un classement des événements historiques ayant conduit à des niveaux d'eau élevés en fonction des paramètres hydrométéorologiques les ayant générés.

Cette analyse se base sur l'étude des phénomènes hydrométéorologiques associés aux événements étudiés, sur l'analyse statistique des niveaux d'eau observés aux marégraphes du GPMR (Grand Port Maritime de Rouen) et GPMH (Grand Port Maritime du Havre) et celle des débits de Poses ou d'Austerlitz.

L'analyse détaillée des résultats obtenus permet d'affiner la connaissance du fonctionnement hydrodynamique de l'estuaire et de la ligne d'eau en Seine Aval.

#### **3.1. INTRODUCTION**

La synthèse des différentes études concernant les différents paramètres hydrométéorologiques est présentée dans ce rapport. Elle est complétée par nos investigations prenant en considération l'ensemble des événements récents.

Les paragraphes suivants présentent les événements historiques retenus et détaillent l'analyse spécifique dont ils ont fait l'objet.

L'analyse mise en œuvre et employée pour l'étude de chaque événement est décrite dans les paragraphes suivants. Elle est identique pour chaque événement historique retenu, ainsi que pour les événements hydrométéorologiques définis dans le cadre des diverses études réglementaires en vigueur sur le secteur d'étude.

La synthèse de cette analyse permet au final de déterminer les grandes familles d'événements hydrométéorologiques générateurs des hauts niveaux d'eau sur le secteur d'étude et de définir les événements historiques et les scénarios (Objectif B) retenus pouvant faire l'objet d'une modélisation (Objectif D de la présente étude).

#### **3.2. CRUES**

##### **3.2.1. Crues de la Seine**

###### **3.2.1.1. HISTORIQUE DES CRUES EN SEINE AVANT 1870**

Les crues de la Seine sont mentionnées dans les archives à partir du XII<sup>e</sup> et surtout du XIII<sup>e</sup> siècle. Ces archives montrent que les crues ne sont pas des événements exceptionnels, d'autant que les chroniques anciennes retiennent essentiellement des événements marquants, alors même que la Boucle de Poses était peu urbanisée. Pour Paris, ville pour laquelle les archives sont particulièrement bien renseignées, les historiens ont dénombré une soixantaine de crues exceptionnelles depuis le VI<sup>e</sup> siècle, soit une tous les 23 ans en moyenne.

Les crues les plus souvent référencées sont :

- 358 : c'est la plus ancienne crue de la Seine relatée dans les textes de l'empereur romain Julien,
- 583 : crue touchant la capitale et les communes au bord du fleuve, rapportée par Grégoire de Tours,
- 876 : toutes les îles de la Seine sont inondées,
- 1658 : c'est la plus haute crue connue (39 cm de plus qu'en 1910),
- 1740 : elle est seulement nommée "crue mémorable".

Mais on note aussi les événements suivants par siècle :

- XII<sup>e</sup> siècle : 1110, 1134, 1147, 1196
- XIII<sup>e</sup> siècle : 1281, 1296
- XIV<sup>e</sup> siècle : 1315, 1343, 1348, 1373, 1382
- XV<sup>e</sup> siècle : 1407, 1426, 1486, 1497
- XVI<sup>e</sup> siècle : 1505, 1560, 1564
- XVII<sup>e</sup> siècle : 1613, 1625, 1648, 1658, 1665, 1690, 1697
- XVIII<sup>e</sup> siècle : 1709, 1711, 1740, 1754, 1787

Peu ou pas de données sont disponibles dans les archives, excepté les dégâts qu'ils ont pu occasionner. Il est donc difficile de les classer.

### 3.2.1.2. HISTORIQUE DES CRUES EN SEINE APRES 1870

Entre 1870 et 1973, la hauteur d'eau a été prise à la station Paris Austerlitz. Cette station est réactivée depuis 2006. Les stations de Poissy et de Poses sont activées depuis 1975.

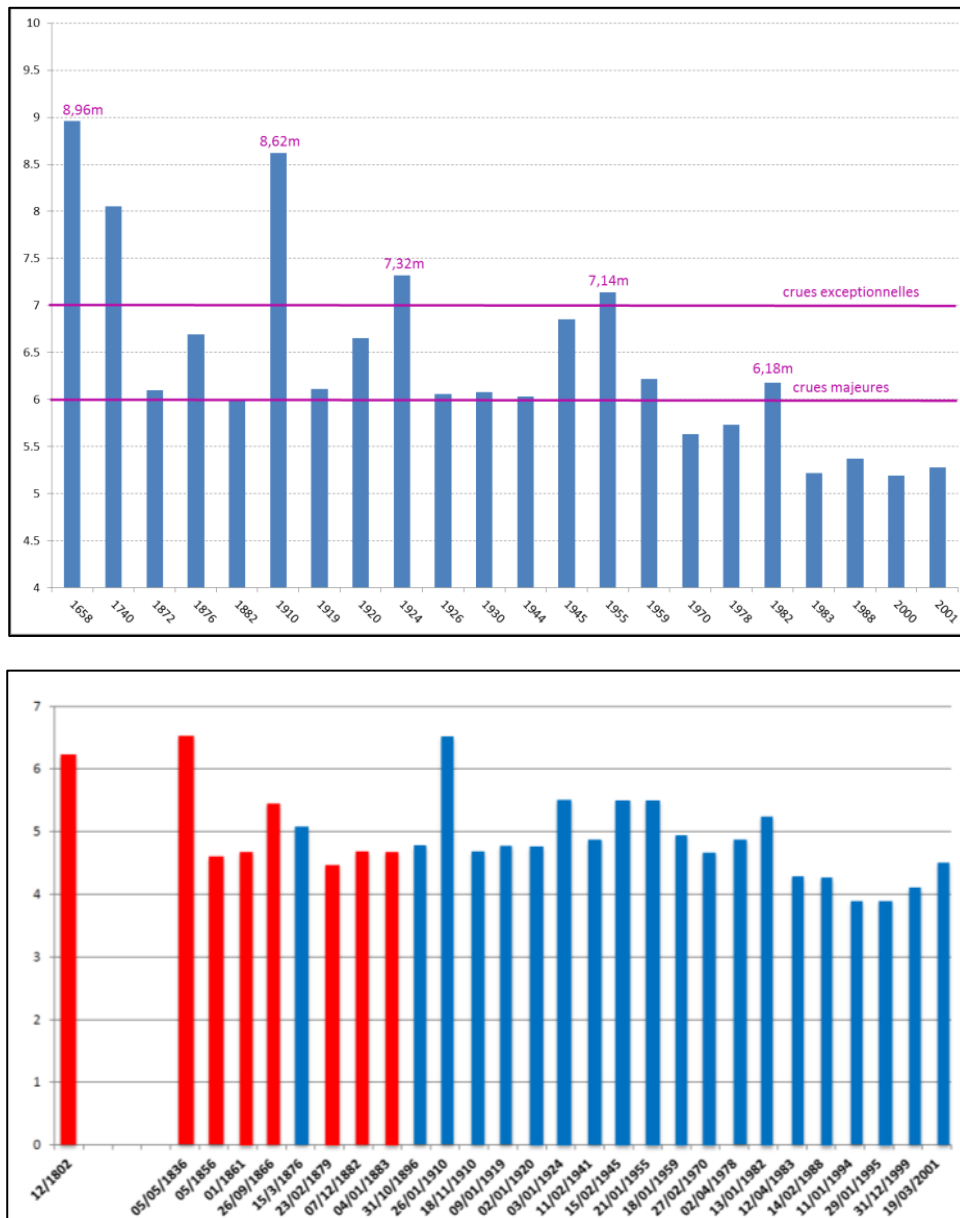
S'il n'y a pas eu de grandes crues depuis une soixantaine d'année, 5 grandes crues se sont produites au XX<sup>e</sup> siècle (cf. Fig. 6) : en 1910, 1920, 1924 1945 et 1955.

La hauteur à l'échelle des crues "décennales" atteint les 6 m NGF. Les crues exceptionnelles, dépassent les 7 m pour les unes ("cinquantennales") et 8 m ("centennales" et plus) pour les autres. Bien qu'elles aient causé des dommages importants, les crues "cinquantennales" de 1924 (7,32 m) et 1955 (7,12 m) n'ont pas tellement marqué les esprits. Par contre la crue "centennale" de 1910 (8,62 m) a été très médiatisée et est devenue une référence. Ce n'est pourtant pas la crue la plus importante connue. En effet, en février 1658, la hauteur atteignait 8,96 m, soit un peu plus de 30 cm par rapport à celle de 1910. Et pourtant, en 1658 la Seine disposait d'une part de vastes espaces pour se répandre et d'autre part de moins de ponts faisant barrage. Cela signifie que si une crue de volume identique à celle de 1658 se reproduisait de nos jours, le niveau serait encore plus élevé. En décembre 1740, une autre crue dépassant légèrement la cote des 8 m s'est produite.

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2



**Fig. 6. Principales crues référencées. En haut à l'échelle du pont d'Austerlitz entre 1872 et 2001, en bas à Melun entre 1802 et 2001 (hauteur en m)**

L'absence de crue exceptionnelle depuis une cinquantaine d'années ne doit donc pas faire oublier que trois d'entre elles se sont produites pendant la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle.

### 3.2.1.3. EVENEMENT DE REFERENCE : 1910

La crue de la Seine de 1910, souvent qualifiée de crue centennale, est le plus important débordement connu de la Seine depuis le XX<sup>ème</sup> siècle (seule la crue de 1658 a engendré des niveaux plus élevées). Il a touché la plus grande partie de sa vallée et, bien qu'il n'ait pas été très meurtrier, a causé d'importants dommages à l'économie régionale, en particulier à Paris. La Seine a atteint son niveau maximal, 8,62 mètres sur l'échelle hydrométrique du pont d'Austerlitz à Paris le 28 janvier. De nombreux quartiers de la capitale et de nombreuses villes riveraines du fleuve ont été affectés pendant plusieurs semaines avant et après cette date, la montée des eaux s'étant faite en une dizaine de jours, tandis que la décrue a demandé environ 35 jours.

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

En 1998, HYDRATEC a étudié la crue de 1910 et estimé le débit à 2400 m<sup>3</sup>/s à Austerlitz, considéré comme un débit centennal. Ces estimations ont été faites à l'aide du modèle de propagation Seine-SBR qui s'est avéré capable de représenter les écoulements largement débordants, peu affectés par les modifications intervenues depuis 1910. Les compléments d'études récents, repris lors du colloque de la SHF en 2010, ont révisés depuis cette valeur. La valeur de la Banque Hydro est de 2670 m<sup>3</sup>/s à Paris, se rapprochant ainsi de l'estimation faite en 1910 à partir de jaugeages (2700 m<sup>3</sup>/s) ; cette valeur fait office maintenant de référence. Aujourd'hui, cette crue est présentée comme exceptionnelle sans lui associer une période de retour claire.

L'analyse hydrologique directe par une loi de Gumbel basée sur les débits maximaux annuels (voir chapitre 4.1.1) montre que la période de retour de cette crue pourrait être estimée à 180 ans à Paris. Sans vouloir introduire de polémique sur la réalité de cette période de retour soumise à controverse, nous utiliserons cette valeur dans la suite du document.

Plus en aval, les différences d'estimation sont nettement plus importantes. HYDRATEC a estimé le débit à 2770 m<sup>3</sup>/s à Mantes (62859 km<sup>2</sup> d'où environ 2930 m<sup>3</sup>/s à Poses – 65000 km<sup>2</sup>). D'après Goutx et Lacaze, l'exploitation des rapports précis réalisés en 1910 à Vernon (64604 km<sup>2</sup>) conduisent à une incertitude portant sur 200 m<sup>3</sup>/s, incertitude basée sur l'estimation du débit par jaugeage à Vernon et faute de crues importantes récentes pour caler les mesures (Nouailhac et Pioch). Les auteurs concluent que la mesure du débit de pointe de la crue de 1910 fournit au final une valeur de 3500 m<sup>3</sup>/s (incertitude 3400-3600) à Vernon. Le rapport entre les bassins versants de Vernon et de Poses est d'environ 1 (64604 / 65000 km<sup>2</sup>) ; le débit à Poses est similaire à celui à Vernon.

Pour autant, l'analyse hydrologique (voir chapitre 4.1.1) montre que l'estimation de 3500 m<sup>3</sup>/s apparaît peu vraisemblable.

### 3.2.2. Aménagements de la Seine

Depuis le XIX<sup>e</sup> siècle, le développement d'activités (pêche, industrie, navigation, port, ...) a engendré la mise en œuvre de nombreux aménagements le long de la Seine, au niveau de l'estuaire de la Seine, entre Rouen et Paris mais aussi en amont de Paris.

Ces aménagements peuvent dans une certaine mesure avoir un impact sur la morphologie de l'estuaire de la Seine et sur l'hydrologie du fleuve, et donc sur les processus hydrauliques.

#### 3.2.2.1. L'ESTUAIRE ET L'EMBOUCHURE DE LA SEINE

Dans le rapport « Evolution morphologique d'un estuaire anthropisé de 1800 à nos jours », Froussard et al. (2009) répertorie les différents aménagements effectués dans l'estuaire de la Seine (cf. Fig. 7) depuis le XIX<sup>e</sup> siècle.

Différents types d'aménagements ont été réalisés :

- Depuis 1848, travaux d'endiguement entre Villequiers et Quillebeuf-sur-Seine puis entre la Malleraye-sur-Seine et la confluence avec la Risle. En 2005, 80% des berges sont artificialisées entre Poses et Tancarville. Ces travaux ont contribué à éroder les sédiments et à approfondir le chenal de navigation ;
- Disparition de 80% des îles entre Poses et l'embouchure depuis 1750 (travaux de dragage ou conséquence de la création des digues), rattachement d'îles aux berges, arasement de certains hauts fonds afin de remédier au problème de niveau d'eau et augmenter le tirant d'eau,

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2



**Fig. 7. Aménagements réalisés dans l'estuaire de la Seine**

- Mise en service en 1887 du canal de Tancarville (entre Tancarville et Le Havre) ;
- Entre 1923 et 1960, déconnection de certains bras secondaires qui a pour conséquence, par exemple, de modifier le tracé de l'Eure et son débouché dans la Seine (PK 218 en aval de l'ancien barrage de Martot au lieu du PK 206 à l'amont de Pont de l'Arche, au début du XX<sup>e</sup> siècle) ;
- Depuis 1867, création et extension des bassins portuaires et des digues au niveau de Rouen et du Havre.

A partir de 1895, débutent des travaux d'aménagement plus spécifiquement dans l'embouchure de la Seine (cf. Fig. 8). Ces travaux se sont poursuivis à partir de 1933 :

- Création de la digue du Ratier et prolongement de la digue Basse Nord (1950/1959),
- Ouverture du nouveau chenal de navigation (1961),
- Ouverture de deux brèches dans la digue du Ratier et la digue Basse Nord (1979),
- Construction du grand canal du Havre,
- Extension du Port du Havre en 2002 (« Port 2000 »).

Ces différents travaux ont conduit à « canaliser » les écoulements de la Seine ce qui a induit une modification des processus d'érosion générés par les courants et un approfondissement du chenal. Les écoulements de la rivière se sont améliorés et l'impact des crues a diminué. Par exemple, à l'échelle de l'estuaire, les dégâts causés par la crue de 1955 ont été moins importants que ceux engendrés par la crue de 1910 du fait d'aménagements de type endiguement, approfondissement du lit, rescindement.

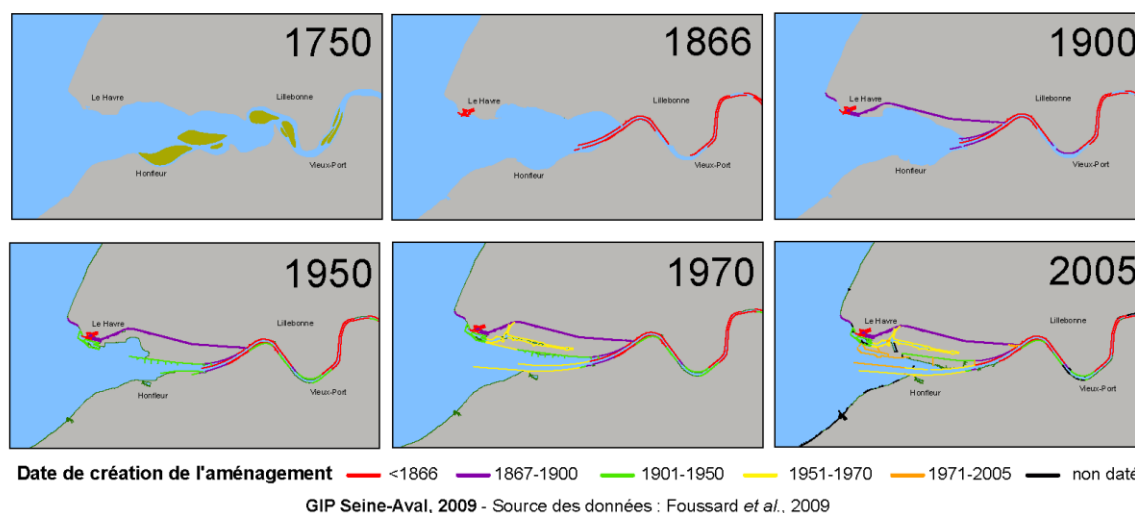
## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

Par contre, les évolutions morphologiques ont conduit à une modification de la propagation de l'onde de marée qui pénètre et se retire plus facilement de l'estuaire. Le courant de jusant a été accéléré favorisant les effets de chasse alors que le phénomène de mascaret (lié à une montée rapide du flot) a disparu. Le marnage a également augmenté avec la création des digues (à Rouen une baisse du niveau des basses mers a été observée). Enfin, la position du point caractéristique, qui correspond au lieu où les niveaux de basse mer restent constants pour tous les coefficients de marée, a été déplacée plus à l'amont (entre Caudebec et Jumiège).

### Evolution de l'aménagement de l'embouchure de la Seine



**Fig. 8. Aménagements réalisés dans l'embouchure de la Seine**

#### 3.2.2.2. OUVRAGES DE POSES-AMFREVILLE

A l'heure actuelle, il existe 7 barrages éclusés entre Paris et Rouen. Sur notre secteur d'étude, seul le barrage de Poses (PK 202) est maintenant présent ; il constitue la limite amont de l'estuaire. En effet le barrage de Martot (PK 216) construit en 1864 a été définitivement supprimé en 1943.

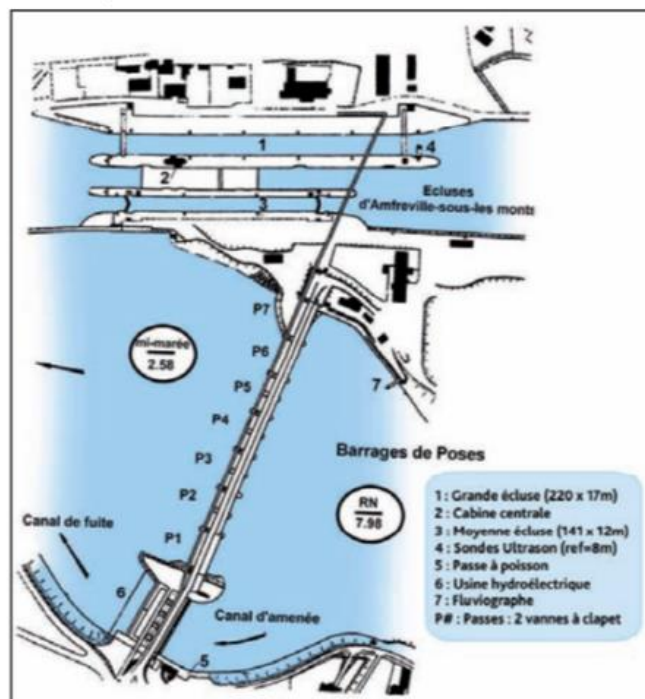
La construction du barrage de Poses s'est achevée en 1886 et a nécessité le déplacement de l'exutoire de la rivière Andelle 100m à l'aval.

Ce barrage, géré par VNF<sup>1</sup>, est de type déversoir mobile montant ou descendant selon les besoins, l'ouverture des vannes permettant à l'eau de passer lorsque le débit (et donc le niveau d'eau) est élevé. Il n'est pas conçu pour retenir et stocker de grands volumes et ne joue aucun rôle de retenue d'eau en période crue. Son fonctionnement ne permet pas de « lâché d'eau » en période d'étiage.

<sup>1</sup> Une convention existe entre le SPC et VNF : VNF fournit au SPC les hauteurs d'eau en amont et en aval du barrage de Poses, ainsi que la valeur estimée du débit sortant au barrage de Poses. Le SPC consulte cette donnée via une interface Web mise en place par la DIREN IDF. VNF informe le SPC des manœuvres exceptionnelles sur l'ouvrage ou de travaux pouvant avoir un impact sur l'écoulement des crues. VNF informe dès que possible le SPC de l'effacement du barrage vis à vis de la crue. (Source : [http://www.seine-maritime.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/spc-sacn-ric-2009-1\\_cle0e8cd8.pdf](http://www.seine-maritime.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/spc-sacn-ric-2009-1_cle0e8cd8.pdf)).

Les principales caractéristiques de ce barrage sont les suivantes :

- Hauteur de retenue : de 5,5 à 8 mètres ;
- Cote de la retenue normale amont : 8m NGF
- Cote de la retenue normale aval : 2,58m NGF
- Débit moyen annuel : 435 m<sup>3</sup>/s (établi à partir des mesures de débit journalier entre 1941 et 2012)
- crue décennale : 2 200 à 2289 m<sup>3</sup>/s \_\_\_\_\_ (voir chapitre 4.1.1)
- crue de 1910 : 3 000 à 3500 m<sup>3</sup>/s \_\_\_\_\_ (voir chapitre 3.2.1.3)
- Etiage quinquennal : de 100 à 200 m<sup>3</sup>/s



**Fig. 9. Schéma du barrage de Poses**

Une centrale hydroélectrique a été construite en 1992 (puissance de 8 mégawatts, 4 turbines) ainsi qu'une passe à poissons (cf. Fig. 9).

### 3.2.2.3. LES GRANDS LACS ET LA BASSEE

Les crues majeures à Paris se forment par la concomitance des crues de la Seine, de l'Yonne et de la Marne :

- Les crues de l'Yonne sont rapides et forment la pointe de crue observée à Paris ;
- L'ouvrage de Pannecière ne contrôle que 2% du bassin versant de l'Yonne.

Les 4 Grands Lacs-réservoirs créés en amont de Paris (voir Fig. 10) jouent le rôle de zone de stockage et permettent d'écrêter les crues et de ralentir ponctuellement la propagation des écoulements.

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

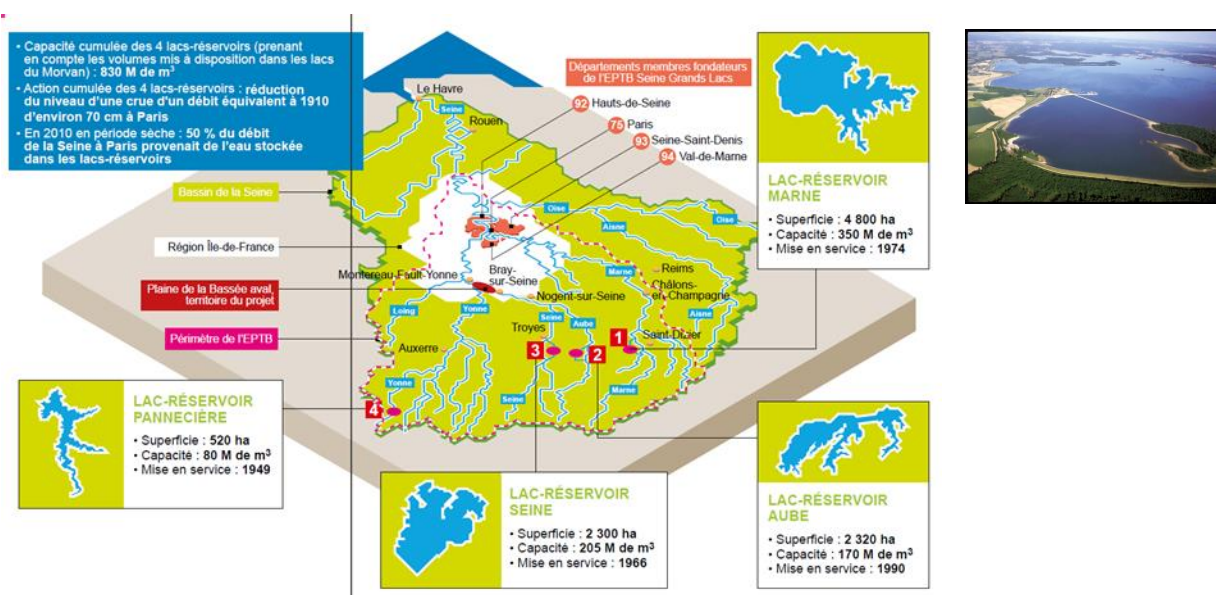
Objectif A

RAPPORT FINAL V2

Ils ont été mis en service dans la période 1949-1990 et sont gérés par l'EPTB Seine Grands Lacs ; ils permettent chaque année de réduire les risques d'inondation à l'aval. Leurs actions combinées diminueraient de 70 cm la hauteur d'eau à Paris dans le cas d'une crue dont le débit serait équivalent à celui de 1910 (IIBRBS, F. Gache, 2010).

**Tabl. 1 - Caractéristiques des 4 Grands Lacs**

Ouvrage	Cours d'eau	Année de mise en service	Volume (en m <sup>3</sup> )	Surface de bassin versant contrôlé
Barrage-réservoir de Pannecière-Chaumard	Yonne	1949	80 millions	220 km <sup>2</sup>
Lac-réservoir « Seine »	Seine	1966	205 millions	2 400 km <sup>2</sup>
Lac-réservoir « Marne »	Marne	1974	350 millions	2 950 km <sup>2</sup>
Lac-réservoir « Aube »	Aube	1991	170 millions	1 700 km <sup>2</sup>



**Fig. 10. Schéma des aménagements des Grands Lacs**

Actuellement, aucune étude n'établit clairement l'influence de ces projets sur les niveaux d'eaux dans l'estuaire et les débits mesurés à Poses. Leur but est de réduire le risque inondation dans la région parisienne et non de réduire les débordements de la Seine dans l'estuaire. Néanmoins ces projets ont eu un impact sur l'hydrologie du fleuve et en particulier sur la crue de période de retour supérieure à 2 ans (c. chapitre 4.1.1).

Dans la continuité, le projet de la Bassée (en cours) consiste à retenir les eaux de la Seine au moment de la crue de l'Yonne en pompant et en stockant l'eau de la Seine dans des casiers au moment des pics de crue. L'aléa inondation s'en trouverait donc réduit. De plus, il est prévu la restauration de la zone humide de la plaine alluviale de la Bassée.



### 3.2.3. Les affluents

Les affluents sont présentés sur la Fig. 1 et sont au nombre de 5 principaux : L'Andelle, L'Eure, Le Cailly, L'Austreberthe et la Risle. La Banque Hydro fourni les données suivantes (Tabl. 2 - ).

**Tabl. 2 - Principaux affluents – Données Banque Hydro**

LIBELLE	DEPARTEMENT	SUPERFICIE	HAUTEURS mesurées	DEBITS mesurés
L'Andelle à Rouvray-Catillon	Seine-Maritime (76)	30,1	1989 - 2013	1989 - 2013
L'Eure à Louviers	Eure (27)	5935	1971 - 2013	1971 - 2013
Le Cailly à Notre-Dame-de-Bondeville	Seine-Maritime (76)	199	1985 - 2013	1963 - 2013
L'Austreberthe à Duclair [Bas Aulnay]	Seine-Maritime (76)	209	1965 - 1999	1965 - 1999
La Risle à Pont-Authou	Eure (27)	1800	1985 - 2013	1967 - 2013

Il est clairement identifiable qu'au vu de la taille des bassins versants concernés, seules l'Eure et la Risle représentent un enjeu potentiel pour la présente étude.

#### 3.2.3.1. L'EURE

Les crues de l'Eure sont généralement liées à des périodes prolongées de fortes précipitations (pluie ou neige) sur l'ensemble de son bassin versant, ce qui entraîne le gonflement des eaux de la rivière qui peut atteindre alors des débits exceptionnels, comme lors des dernières crues de 1995, 1999 et 2001. Il s'agit en général de crues à montée dite lente.

En 1910, la Seine est sortie de son lit par des brèches ouvertes dans sa digue rive gauche entre les communes de Saint-Pierre du Vauvray et Portejoie. Les lits majeurs de l'Eure et de la Seine se sont confondus dans la partie où leurs cours sont parallèles (de Saint Etienne du Vauvray jusqu'aux Damps) et la Seine est remontée dans le cours inférieur de l'Eure. En effet, les crues fortes comme celle de 1910 touchent la vallée de l'Eure en aval d'Incarville de deux façons : d'une part par des écoulements d'est en ouest qui franchissent la voie ferrée (le remblai est insubmersible mais le passage de l'eau se fait par les passages sous voie), d'autre part par le remous de la Seine dans le cours aval de l'Eure. Dans les secteurs les plus élevés de la Boucle de Poses, l'eau n'a pas dépassé 50 cm ; dans les points les plus bas, non bâtis, les hauteurs ont pu atteindre 2 mètres.

Les crues de la Seine et de l'Eure ne sont pas forcément concomitantes. La plus grande crue connue de l'Eure dans la période de 1870 à aujourd'hui est celle de 1881, mais peu d'informations sont disponibles dans ce secteur sur l'étendue de son champ d'inondation. Des laisses de crue à proximité du lit mineur sont cependant disponibles et ont permis de s'assurer que les cotes étaient les plus hautes eaux connues. Aucune estimation proposée pour le débit de 1881 n'a été retenue par la DIREN Haute-Normandie, par manque de données.

Les autres crues importantes sont celles de 1966 (débit estimé à 129 m<sup>3</sup>/s), de 1979 (102 m<sup>3</sup>/s), celle de 1995 (117 m<sup>3</sup>/s), de 2000 (108 m<sup>3</sup>/s) et enfin celle de mars 2001 (133 m<sup>3</sup>/s). La crue centennale modélisée, obtenue par ajustement statistique à une loi de Gumbel, aurait un débit estimé de 150 m<sup>3</sup>/s environ.

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

La valeur proposée de 167 m<sup>3</sup>/s dans le Tabl. 19 - en crue centennale a été établie par la loi de Gumbel actualisée sur la base des dernières données disponibles.

Selon le PPRI (2002), la crue de la Seine de 1910 est la crue de référence sur le secteur de la boucle de Poses, c'est-à-dire l'ensemble des communes de la boucle de Poses hormis certaines zones des communes du Vaudreuil, de Val-de-Reuil et de Saint Etienne du Vauvray. La crue de l'Eure de 1881 est la crue de référence pour les secteurs situés à l'amont de « l'île d'Homme » sur la commune du Vaudreuil.

### 3.2.3.2. LA RISLE

Deux crues ont fortement marqué les esprits dans la vallée de la Risle : il s'agit des crues de mars 2001 et de novembre 1966.

La crue de 2001, est l'événement le plus récent et le plus marquant pour le bassin versant de la Risle. A la station de Pont-Authou, le débit instantané maximal fut atteint le 26 mars 2001, et s'élevait à 115 m<sup>3</sup>/s. En comparant aux débits caractéristiques calculés par la méthode du GRADEX (méthodes basées sur les caractéristiques pluviométriques), on trouve que ce débit possède une période de retour de 45 ans.

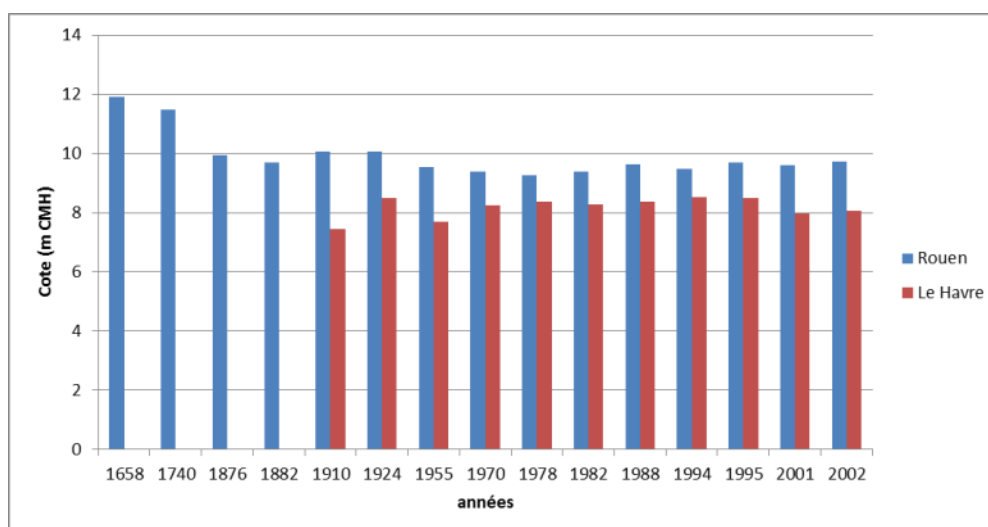
La crue centennale sert de référence pour le PPRI de la vallée (2006), et est estimée à 145 m<sup>3</sup>/s.

### 3.2.4. Les effets des crues en aval de Poses : Rouen et Le Havre

Le Tabl. 3 - synthétise les niveaux observés à Rouen et au Havre pendant les événements de crue historiques. Si les plus hautes crues fournissent les niveaux les plus importants à Rouen, la relation au Havre est faible.

**Tabl. 3 - Cotes à Rouen et au Havre pour les différentes crues répertoriées**

EVENEMENTS	COTE A ROUEN (M CMH)	COTE AU HAVRE (M CMH)
1658	11,92	
1740	11,25	
1876	9,94	
1882	9,70	
1910	10,05	7,45
1920	10,03	8,5
1955	9,53	7,68
1970	9,38	8,26
1978	9,25	8,37
1982	9,38	8,27
1988	9,63	8,36
1994	9,48	8,52
1995	9,69	8,5
2001	9,60	7,97
2002	9,72	8,06



**Fig. 11. Niveau extrêmes référencés à Rouen et au Havre**

On remarque que les deux événements de 1658 et 1740 sont hors norme pour Rouen.

### 3.2.5. Événements maritimes

Le Tabl. 4 - synthétise les niveaux observés à Rouen et au Havre pendant les événements de tempêtes et coups de vents historiques. Comparativement aux cotes des événements de crue (Tabl. 3 - ), les cotes au Havre sont nettement supérieures, montrant une relation directe. D'autre part, ces coups de vents montrent des cotes à Rouen aussi importantes que la plupart des crues historiques.

**Tabl. 4 - Cotes à Rouen et au Havre pour les événements maritimes répertoriés**

EVENEMENTS	TYPE	COTE A ROUEN (M CMH)	COTE AU HAVRE (M CMH)
Nov-1810	Coup de vent	10,04	
Janv-1890	Coup de vent		9,15
Fev-1990	Tempête	9,64	9,33
Janv. 1999	Coup de vent	9,52	8,92
Déc. 2004	Tempête	8,38	8,69
Mars-2008	Tempête	9,03	8,69
Fev-2010	Tempête Xynthia	9,33	8,84

### 3.3. EVENEMENTS HISTORIQUES EN SEINE AVAL

#### 3.3.1. Principes d'analyse

Il a été fait le choix de nommer chaque événement historique étudié par la date pour laquelle les niveaux les plus importants ont été observés.

L'analyse de chaque événement se présente sous la forme suivante :

- **Description de l'événement** : présentation des phénomènes générateurs des hauts niveaux d'eau observés, synthèse des données principales issues de l'analyse statistique sur les niveaux maximaux (temps de retour des niveaux maximaux atteints par sous-secteur homogène). Cette description présente une vision globale de l'événement,
- **Caractéristiques hydrométéorologiques**, classées en trois catégories et présentées sous forme de tableaux :
  - *Données fluviales* pour la Seine, l'Eure et la Risle :
    - Les valeurs maximales de débits et de niveaux d'eau sont présentées. Ces valeurs correspondent au débit maximal observé le jour de l'événement (pic) et aux valeurs maximales de niveaux d'eau sur l'ensemble de la période de l'événement.
    - Les temps de retour des débits maximaux sont proposés de manière à pouvoir quantifier l'importance des apports fluviaux associés à l'événement.
  - *Données maritimes* aux marégraphes du Havre :
    - Les niveaux d'eau maximaux observés lors de la pleine-mer de la marée de l'événement considéré sont présentés. Ces niveaux ne correspondent pas forcément aux niveaux maximaux observés sur la période totale de l'événement, notamment lorsqu'il s'agit d'un événement de type fluvial et en période de coefficients de marée croissants au cours de l'événement.
    - A chaque marégraphe, le temps de retour associé au niveau maximal de l'événement est déterminé et présenté. Ce temps de retour est déterminé à partir de l'analyse réalisée sur les données en niveau de pleine mer au Havre.
  - *Données générales* : pour chaque événement, sont également indiqués :
    - le coefficient de marée (fourni par le SHOM) associé au pic de l'événement,
    - les vitesses des vents moyens et maximaux le jour du pic, fournis par Météo-France à la station météorologique du Cap d'Hève,
    - la surcote au Havre (la surcote est soit issue d'études antérieures soit calculée à partir des niveaux d'eau prédits par le SHOM et des niveaux d'eau mesurés aux marégraphes).

### 3.3.2. Evénements

Les événements retenus pour analyse sont les suivants :

**Tabl. 5 - Récapitulatif des principaux événements historiques**

EVENEMENTS	CARACTERISTIQUES	COTE A ROUEN (M CMH)	COTE AU HAVRE (M CMH)
1658	PHEC Rouen		
1740	2 <sup>e</sup> PHEC Rouen	11,25	
1810	Plus fort impact sur Rouen d'un coup de vent connu	10,04	
Janv-1890	Coup de vent		9,15
1910	Crue de référence pour PPRI	10,05	7,45
1920	Crue majeure	10,03	8,5
1955	3 <sup>e</sup> Crue exceptionnelle	9,53	7,68
1982	Crue type décennale	9,38	8,27
Fev-1990	Tempête	9,64	9,33
1995	Crue type décennale	9,69	8,5
Janv. 1999	Coup de vent	9,52	8,92
2001	Crue type décennale	9,60	7,97
2002	Crue moyenne	9,72	8,06
Déc. 2004	Tempête	8,38	8,69
Mars-2008	Tempête	9,03	8,69
Fev-2010	Tempête Xynthia	9,33	8,84

### 3.4. ANALYSE DES EVENEMENTS HISTORIQUES

#### 3.4.1. Caractérisation des événements

La représentation des niveaux d'eau le long de l'estuaire de la Seine entre Poses et Honfleur est présentée ci-après pour les événements répertoriés entre 1658 et 2010 (Cf. Fig. 12).

Ce graphique met bien en avant la présence de niveaux d'eau exceptionnels à Rouen lors des crues de 1658 et 1740. Le caractère exceptionnel de l'événement de 1810 apparaît clairement avec des niveaux d'eau élevés essentiellement à l'aval de Duclair (PK 278). Différentes catégories d'événements apparaissent :

- Les événements qui ont un impact sur tout l'estuaire,
- Les événements qui ont un impact plutôt sur les niveaux d'eau à l'aval de l'estuaire comme les événements de 2004 ou 2008 où les niveaux d'eau sont plus élevés à l'aval de Caudebec (PK310,5) ; l'aval est globalement plus sensible aux phénomènes maritimes et météorologiques.
- Les événements qui sont de type plutôt fluvial (prédominance de forts débits) et qui ont un impact plutôt à l'amont de l'estuaire (1910, 1920, 1955).

Suite à l'analyse des résultats précédents et à l'analyse des lignes d'eau, il a été fait le choix de retenir et de caractériser certains événements types.

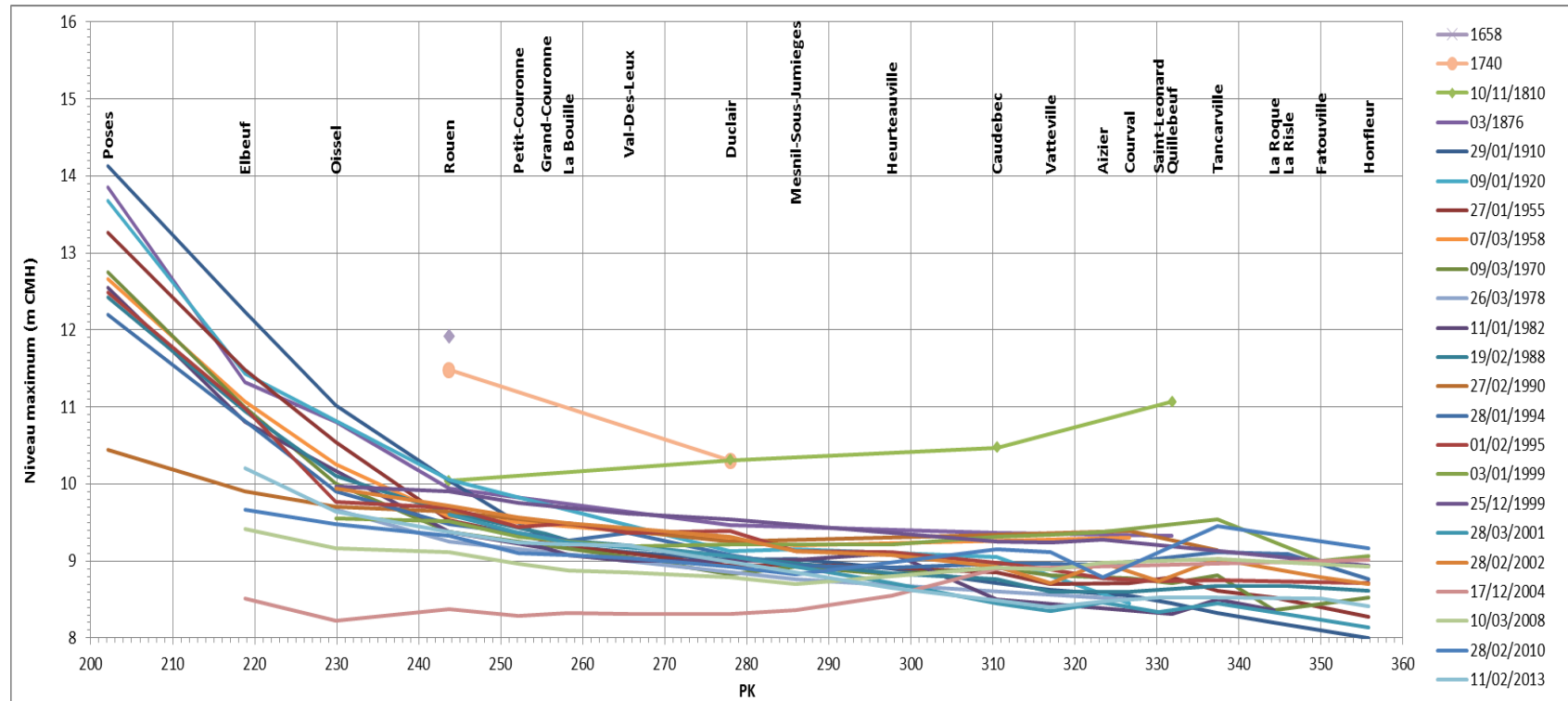
**Tabl. 6 - Liste des événements**

EVENEMENTS	
DATE	TYPE
1658	PHEC à Rouen
1740	2 <sup>ème</sup> PHEC à Rouen
1810	Violent ouragan, tempête la plus violente
1890	Coup de vent
1910	Crue de référence pour les PPRI
1920	Crue majeure
1955	Crue majeure
1970	Crue type décennale
1990	Tempête
1995	Crue type décennale
1999	Tempêtes
2001	Crue type décennale
2004	Tempête
2008	Tempête
2010	Tempête Xynthia

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2



**Fig. 12. Niveaux d'eau maximaux le long de l'estuaire (de Poses à Honfleur) pour différents événements**

### 3.4.2. Evénements de 1658 – 1740 – 1810 et 1890

Ces 4 événements sont très peu documentés dans la littérature car très anciens. Cependant, ils correspondent à des situations non négligeables.

En effet, la crue de 1658 est la plus haute crue connue (1,85 m environ de plus à Rouen et 30 cm de plus à Paris qu'en 1910). Le niveau atteint à Rouen correspond aux Plus Hautes Eaux Connues (11,92 m CMH). Au pont d'Austerlitz, le niveau atteint est de 8,96 m à l'échelle de Paris-Austerlitz (Source DRIEE Ile de France).

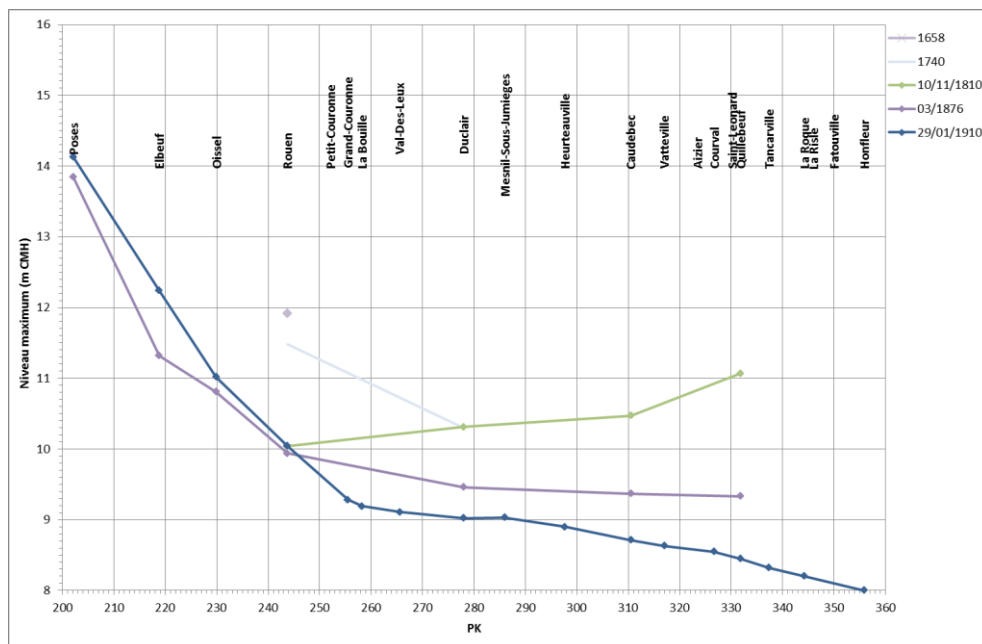
La crue de 1740 est dénommée « crue mémorable ». C'est le 2<sup>e</sup> événement le plus important en termes de niveau d'eau à Rouen (11,84 m CMH) ; le niveau a atteint les 8,05 m à l'échelle de Paris-Austerlitz (Source DRIEE Ile de France).

Quant aux événements de 1810, 1876 et 1890, ils correspondent plutôt à de forts coups de vents. Aucune information précise n'est cependant disponible sur l'intensité de ces vents.

En 1810, la coïncidence entre la pleine mer et des vents violents (de secteur sud-sud-ouest puis nord-nord-ouest) aurait engendré un important gonflement de la mer. Cette épisode est qualifié d'« affreux ouragan, de tempête, d'une violence au-dessus de tout ce que mémoire d'homme a conservé dans le pays » (Historique des tempêtes et des inondations à l'embouchure de la Seine – GIPSA et al.).

Le comportement atypique de la ligne d'eau de 1810 par rapport à tous les événements recensés est observé sur la Fig. 12. Cet événement génère des niveaux d'eau bien plus élevés que la crue de 1910 à l'amont de Rouen (1 m de plus à Caudebec par rapport à 1910 - Cf. Fig. 13).

L'événement de 1890 est quant à lui décrit comme un raz de marée (concomitance entre un ouragan et des grandes marées).



**Fig. 13. Niveaux d'eau maximums le long de l'estuaire (de Poses à Honfleur) pour les événements de 1658, 1740, 1810, 1876 et 1910**



*Commentaire important :*

*Il faut cependant relativiser ces éléments par leur ancienneté et leur faible documentation. Quel crédit accorder à ces chiffres ? Cette question reste clef pour la suite de l'étude.*

### 3.4.3. Événement de 1910

#### 3.4.3.1. DESCRIPTION

La crue de janvier 1910 est la crue de référence pour la mise en place de la prévention contre les inondations par débordement de la Seine. Elle a marqué les esprits par son intensité mais aussi par les dégâts qu'elle a occasionnés (voir aussi chapitre 3.2.1.3).

Cette crue est un événement de type fluvial appartenant à la catégorie « des crues doubles » résultant de la combinaison de 2 épisodes pluvieux successifs et rapprochés qui ont provoqué une crue subite de l'Yonne, du Loing et du Grand Morin. A cela s'ajoute une crue exceptionnelle du bassin versant de la Marne et de la Haute Seine, ainsi qu'une chute de la pression atmosphérique (1003 hPa) et des températures.

Le coefficient de marée est moyen (78).

Le débit associé à cet événement est de 2670 m<sup>3</sup>/s à Austerlitz et estimé entre 3000 et 3500 m<sup>3</sup>/s à Poses.

Le temps de retour associé à cet événement est de 100 ans à Paris et d'environ 50 ans à Rouen.

#### 3.4.3.2. CARACTERISTIQUES HYDROMETEOROLOGIQUES

**Tabl. 7 - Caractéristiques hydrologiques de l'événement de 1910 – Débits et niveaux**

NIVEAUX MAXIMAUX		
STATION	NIVEAU D'EAU (M NGF)	NIVEAU D'EAU (M CMH)
<i>Austerlitz</i>	8,62	13,45
<i>Rouen</i>	5,21	10,05
<i>Havre</i>	2,61	7,45

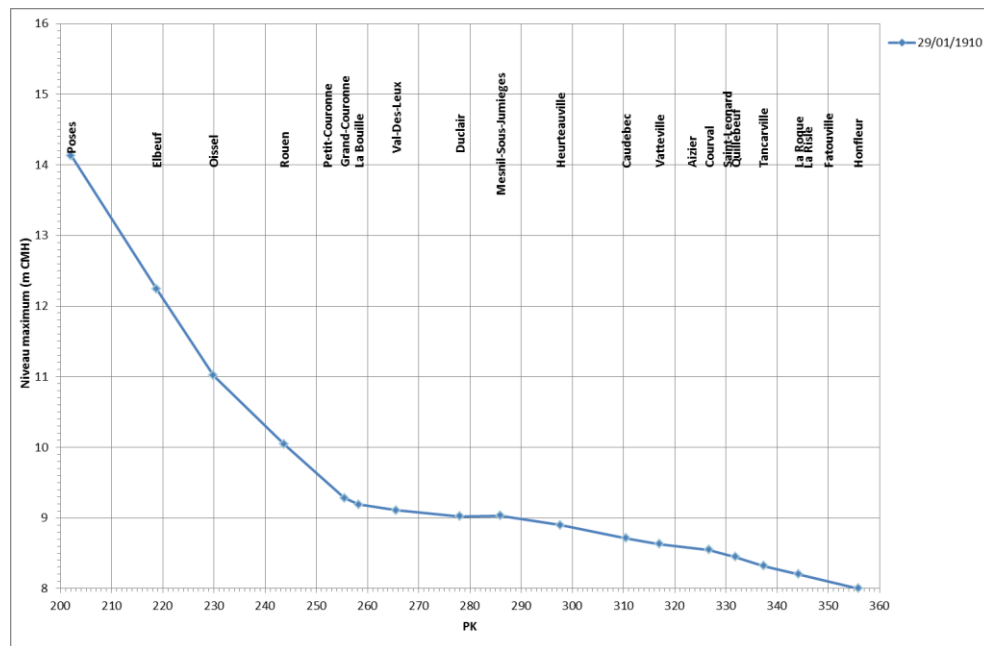
DEBITS	
STATION	DEBITS (M <sup>3</sup> /S)
<i>Austerlitz</i>	2670
<i>Poses</i>	3000-3500

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

### 3.4.3.3. GRAPHIQUE DE SYNTHESE



**Fig. 14.** Niveaux d'eau maximaux le long de l'estuaire (de Poses à Honfleur) pour l'événement de 1910

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

### 3.4.4. Événement de 1920

#### 3.4.4.1. DESCRIPTION

La crue de janvier 1920 est une crue majeure de la Seine.

Le coefficient de marée correspondant est de 98 (vive-eau moyenne à vive-eau exceptionnelle).

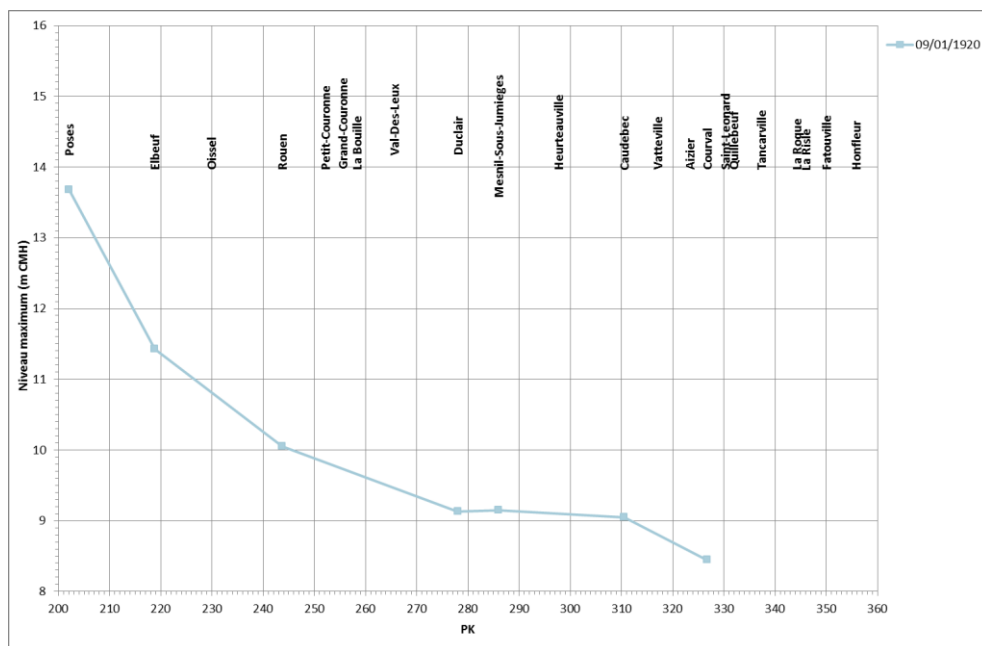
Le débit associé à cet événement est de 2380 m<sup>3</sup>/s à Austerlitz

#### 3.4.4.2. CARACTERISTIQUES HYDROMETEOROLOGIQUES

**Tabl. 8 - Caractéristiques hydrologiques de l'événement de 1920 – Niveaux**

NIVEAUX MAXIMAUX		
STATION	NIVEAU D'EAU (M NGF)	NIVEAU D'EAU (M CMH)
<i>Austerlitz</i>	6,65	11,48
<i>Rouen</i>	5,21	10,05
<i>Havre</i>	3,66	8,50

#### 3.4.4.3. GRAPHIQUE DE SYNTHESE



**Fig. 15. Niveaux d'eau maximums le long de l'estuaire (de Poses à Honfleur) pour l'événement de 1920**

### 3.4.5. Evénement de 1955

#### 3.4.5.1. DESCRIPTION

Cet événement du 27 Janvier 1955 est une crue majeure de catégorie « simple » puisqu'elle est essentiellement liée à un épisode pluvieux de forte intensité générant des crues sur les bassins de l'Yonne, de la Marne et de la petite Seine. La combinaison de ces crues a créé une crue importante sur la Seine.

Le coefficient de marée associée est de 92 (vive-eau moyenne).

Le débit associé à cet événement est de 2200 m<sup>3</sup>/s à Poses.

#### 3.4.5.2. CARACTERISTIQUES HYDROMETEOROLOGIQUES

**Tabl. 9 - Caractéristiques hydrologique de l'événement de 1955 –Niveaux et Débits**

NIVEAUX MAXIMAUX		
STATION	NIVEAU D'EAU (M NGF)	NIVEAU D'EAU (M CMH)
<i>Austerlitz</i>	7,12	11,83
<i>Rouen</i>	4,82	9,53
<i>Havre</i>	2,97	7,68

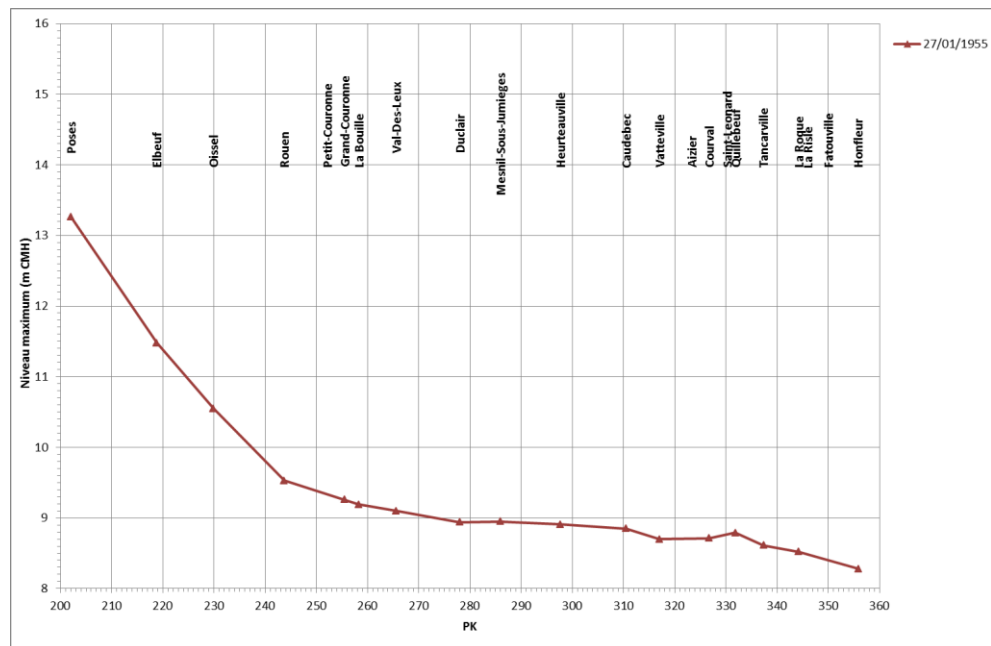
STATION	DEBITS (M <sup>3</sup> /S)
<i>Austerlitz</i>	2140
<i>Poses</i>	2200

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

### 3.4.5.3. GRAPHIQUE DE SYNTHESE



**Fig. 16.** Niveaux d'eau maximums le long de l'estuaire (de Poses à Honfleur) pour l'événement de 1955

### 3.4.6. Evénement de 1970

#### 3.4.6.1. DESCRIPTION

La crue de mars 1970 est un événement fluvial, associée à de forts débits dus à d'intenses précipitations combinées à un fort coefficient de marée (114), une baisse de la pression atmosphérique (985 hPa) et un vent de sud-ouest de 60 km/h. C'est une crue subite au cours de laquelle les débordements durent 4 jours à Rouen.

Le débit associé à cet événement est de 2089 m<sup>3</sup>/s à Poses.

Cet événement est exceptionnel au niveau de l'estuaire de la Seine puisque la crue se propage bien plus à l'aval qu'en 1910.

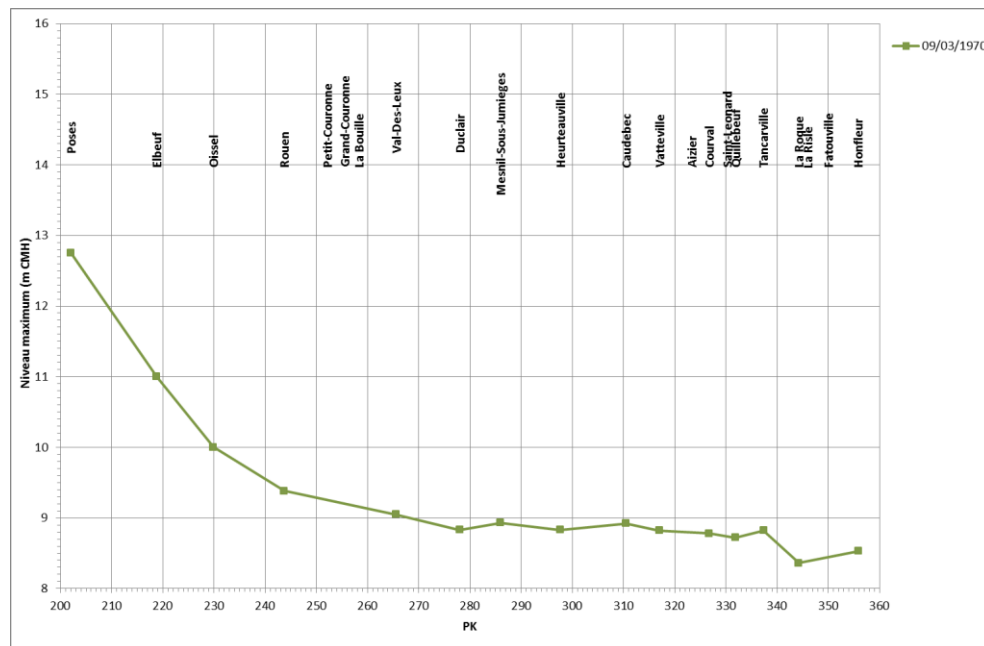
#### 3.4.6.2. CARACTERISTIQUES HYDROMETEOROLOGIQUES

**Tabl. 10 - Caractéristiques hydrologiques de l'événement de 1970 – Niveaux et Débits**

NIVEAUX MAXIMAUX		
STATION	NIVEAU D'EAU (M NGF)	NIVEAU D'EAU (M CMH)
<i>Austerlitz</i>		
<i>Rouen</i>	5,00	9,38
<i>Havre</i>	3,88	8,26

DEBITS	
STATION	DEBITS (M <sup>3</sup> /S)
<i>Austerlitz</i>	2089
<i>Poses</i>	1680

### 3.4.6.3. GRAPHIQUE DE SYNTHESE



**Fig. 17. Niveaux d'eau maximums le long de l'estuaire (de Poses à Honfleur) pour l'événement de 1970**

Caractéristiques de l'événement :

- Coefficient de marée : 114
- Vent moyen : 60 km/h
- Pression atmosphérique : 985 hPa.
- Débit à Poses : 2089 m<sup>3</sup>/s

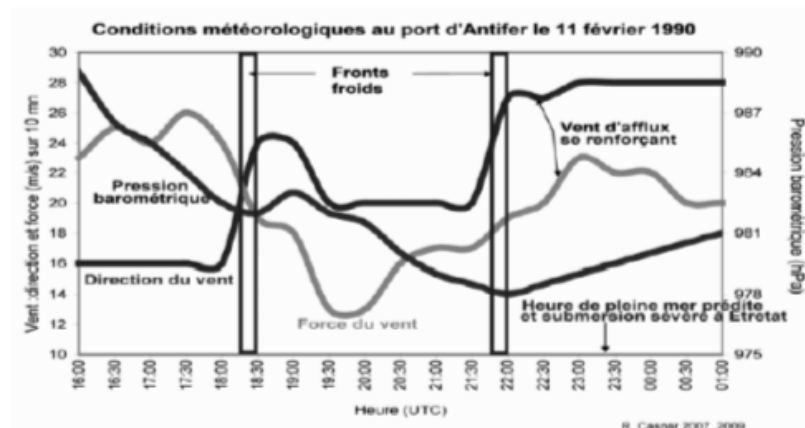


### 3.4.7. Evénement de 1990

#### 3.4.7.1. DESCRIPTION

L'événement de février 1990 est un événement de type maritime, car il a été plutôt généré par des facteurs de type maritime et météorologique : la concomitance entre des dépressions (pression atmosphérique : 1004hPa), des vents violents de secteur sud-ouest avec des pointes supérieures à 130km/h et une marée de vives eaux de coefficient 106.

Le niveau d'eau répertorié au Havre lors de cette tempête est le niveau le plus élevé que le marégraphe a enregistré (4,95 m NGF ou 9,33 m CMH). La surcote au Havre est d'environ 1m (Caspar et al. 2007).



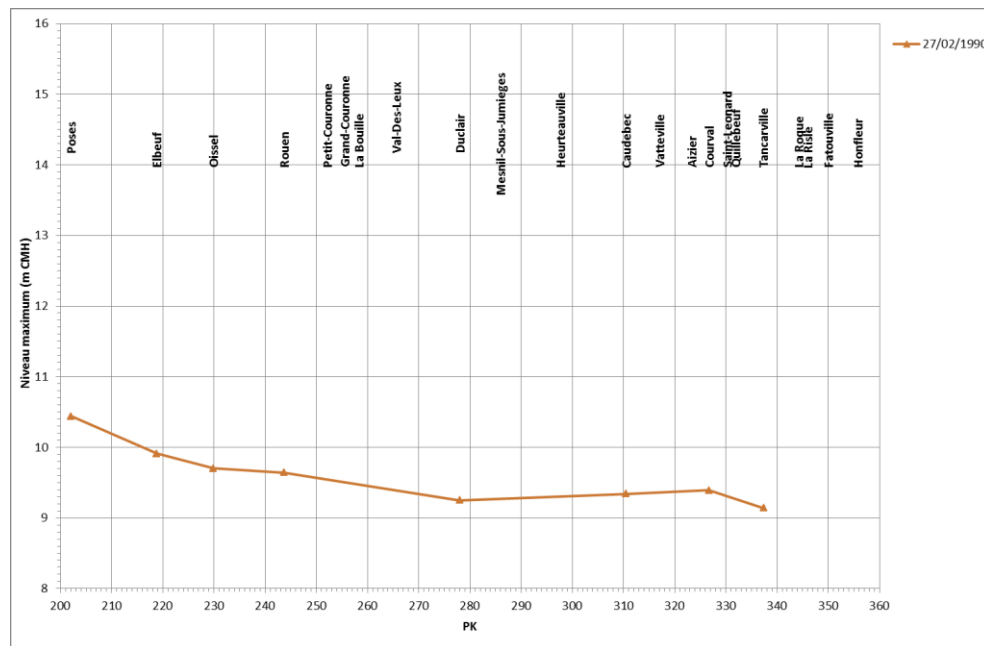
**Fig. 18. Conditions météorologiques au port d'Antifer (Le Havre) lors l'événement de 1990 (Source : Caspar et al. - 2010)**

#### 3.4.7.2. CARACTERISTIQUES HYDROMETEOROLOGIQUES

**Tabl. 11 - Caractéristiques hydrologique de l'événement de 1990 – Niveaux**

NIVEAUX MAXIMAUX		
STATION	NIVEAU D'EAU (M NGF)	NIVEAU D'EAU (M CMH)
<i>Austerlitz</i>		
<i>Rouen</i>	5,26	9,64
<i>Havre</i>	4,95	9,33

### 3.4.7.3. GRAPHIQUE DE SYNTHESE



**Fig. 19. Niveaux d'eau maximums le long de l'estuaire (de Poses à Honfleur) pour l'événement de 1990**

Caractéristiques de l'événement :

- Coefficient de marée : 106
- Vent moyen : 79 km/h
- Vent en pointe : >130 km/h
- Débit à Poses : 641 m<sup>3</sup>/s

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

### 3.4.8. Evénement de 1995

#### 3.4.8.1. DESCRIPTION

Des pressions atmosphériques basses (1000 hPa) apparaissent en concomitance avec 2 forts coups de vents d'Ouest (47 km/h). Avec l'augmentation du coefficient de marée (104) et des débits, la Seine déborde (pendant 16 jours à Rouen).

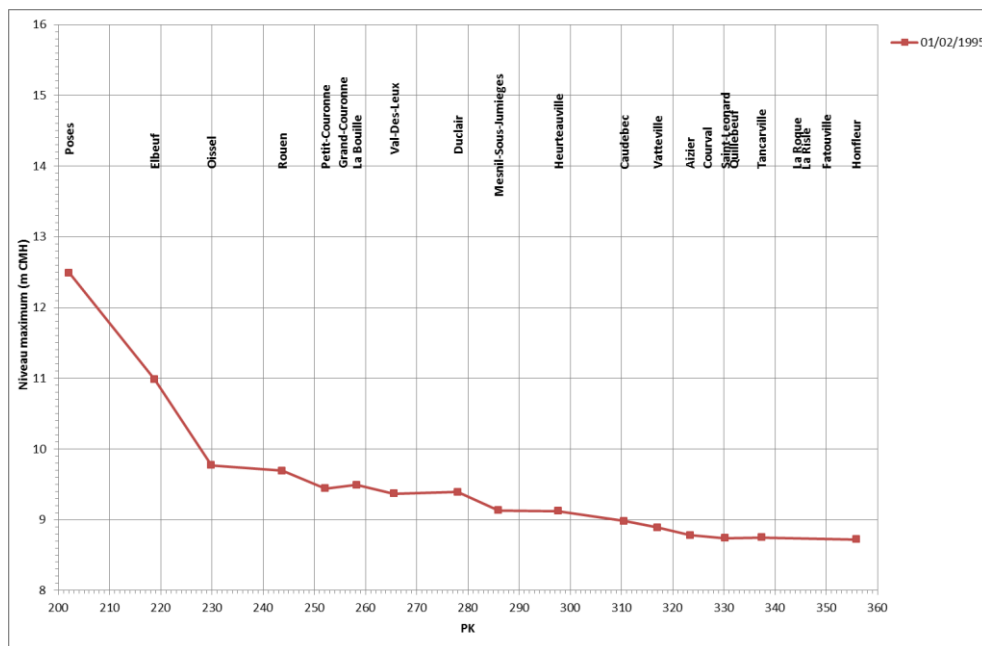
Le débit associé à cet événement est de 2153 m<sup>3</sup>/s à Poses.

#### 3.4.8.2. CARACTERISTIQUES HYDROMETEOROLOGIQUES

**Tabl. 12 - Caractéristiques hydrologiques de l'événement de 1995 – Niveaux**

NIVEAUX MAXIMAUX		
STATION	NIVEAU D'EAU (M NGF)	NIVEAU D'EAU (M CMH)
<i>Austerlitz</i>		
<i>Rouen</i>	5,31	9,69
<i>Havre</i>	4,12	8,5

#### 3.4.8.3. GRAPHIQUE DE SYNTHESE



**Fig. 20. Niveaux d'eaux maximums le long de l'estuaire (de Poses à Honfleur) pour l'événement de 1995**

Caractéristiques de l'événement :

- Coefficient de marée : 104
- Vent moyen : 47 km/h
- Pression atmosphérique : 1000 hPa
- Débit à Poses : 2153 m<sup>3</sup>/s

### 3.4.9. Evénements de 1999

#### 3.4.9.1. DESCRIPTION

Deux événements ont eu lieu au cours de l'année 1999.

Celui du 3 janvier 1999 est un événement maritime assez similaire à celui de Février 1990 : il est lié à une baisse de la pression atmosphérique (environ 1010 hPa) associé à des vents violents qui atteignent les 108 km/h et un coefficient de marée important (100).

Le débit associé à cet événement est faible (626 m<sup>3</sup>/s à Poses).

L'événement du 25 Décembre 1999 est généré également par des faibles pressions (993 hPa) et un coefficient de marée élevée (104), mais cette fois-ci les vents de sud-ouest soufflent aux alentours de 80 km/h et le débit de la Seine à Poses est plus élevé (1407 m<sup>3</sup>/s). Cet événement a engendré des niveaux d'eaux plus importants que celui de janvier 1999 sur la majorité de l'estuaire à l'amont de Caudebec (PK 310,5).

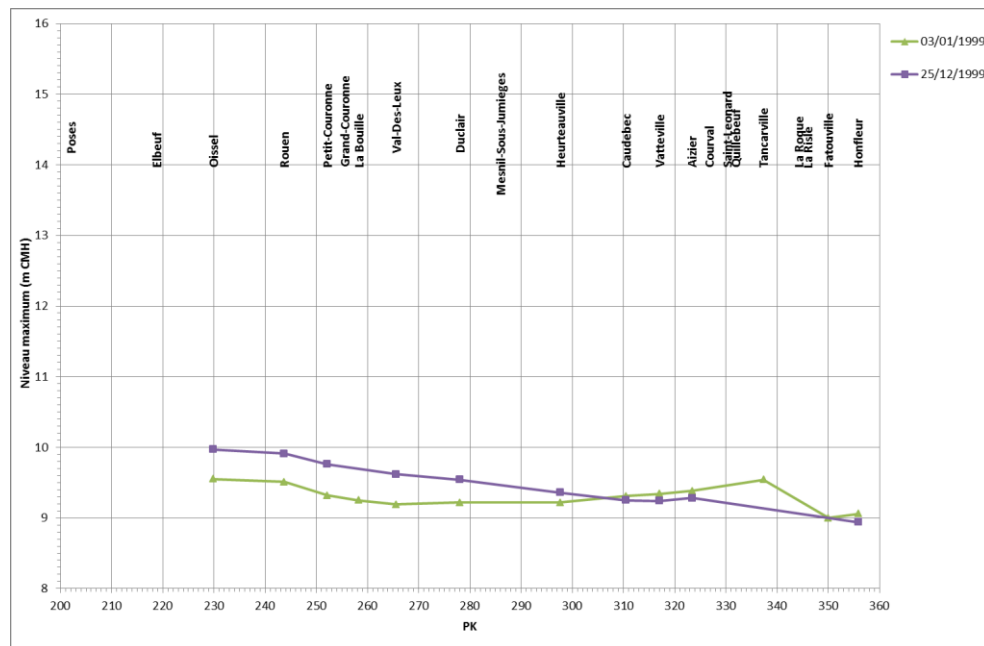
#### 3.4.9.2. CARACTERISTIQUES HYDROMETEOROLOGIQUES

**Tabl. 13 - Caractéristiques hydrologiques des événements de 1999 – Niveaux**

NIVEAUX MAXIMAUX		
STATION	NIVEAU D'EAU (M NGF) 3 JANVIER 1999	NIVEAU D'EAU (M CMH) 3 JANVIER 1999
<i>Austerlitz</i>		
<i>Rouen</i>	5,14	9,52
<i>Havre</i>	4,54	8,92

NIVEAUX MAXIMAUX		
STATION	NIVEAU D'EAU (M NGF) 25 DECEMBRE 1999	NIVEAU D'EAU (M NGF) 25 DECEMBRE 1999
<i>Austerlitz</i>		
<i>Rouen</i>	5,53	9,91
<i>Havre</i>	4,46	8,84

### 3.4.9.3. GRAPHIQUE DE SYNTHÈSE



**Fig. 21. Niveaux d'eau maximaux le long de l'estuaire (de Poses à Honfleur) pour les événements de 1999**

Caractéristiques de l'événement du 3 janvier 1999 :

- Coefficient de marée : 100
- Vent moyen : 108 km/h
- Pression atmosphérique : 1010 hPa
- Débit à Poses : 626 m<sup>3</sup>/s

Caractéristiques de l'événement du 25 décembre 1999 :

- Coefficient de marée : 104
- Vent moyen : 80 km/h
- Pression atmosphérique : 993 hPa
- Débit à Poses : 1407 m<sup>3</sup>/s

### 3.4.10. Evénement de 2001

#### 3.4.10.1. DESCRIPTION

L'événement du 28 mars 2001, plutôt de type fluvial, résulte de la combinaison de divers paramètres :

- Débit élevé (2280 m<sup>3</sup>/s à Poses) ;
- Forte dépression (996 hPa) ;
- Vents de secteur sud/sud-ouest de 29km/h.

Le coefficient de marée associé est de 89.

Le caractère exceptionnel de cet événement est dû à sa longueur dans le temps puisque que les débordements à Rouen ont duré 28 jours.

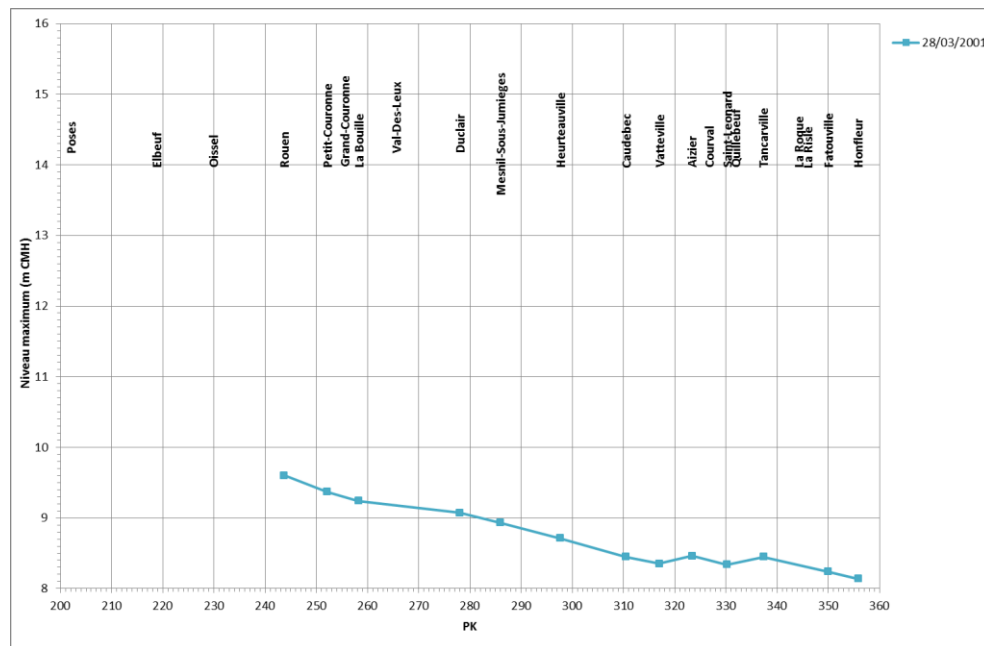
Cette crue est du même type que celles de 1970 et 1995 en termes de paramètres déclencheurs et de niveau d'eau atteint à Rouen. La ligne d'eau apparaît cependant plus pentue entre Val-des-Leux et Caudebec que celle de 1970 et 1995.

#### 3.4.10.2. CARACTERISTIQUES HYDROMETEOROLOGIQUES

**Tabl. 14 - Caractéristiques hydrologiques de l'événement de 2001 – Niveaux**

NIVEAUX MAXIMAUX		
STATION	NIVEAU D'EAU (M NGF)	NIVEAU D'EAU (M CMH)
<i>Austerlitz</i>	5,28	9,66
<i>Rouen</i>	5,22	9,60
<i>Havre</i>	3,60	7,98

## 3.4.10.3. GRAPHIQUE DE SYNTHESE



**Fig. 22. Niveaux d'eau maximums le long de l'estuaire (de Poses à Honfleur) pour l'événement de 2001**

Caractéristiques de l'événement :

- Coefficient de marée : 104
- Vent moyen : 80 km/h
- Pression atmosphérique : 993 hPa
- Débit à Poses : 1407 m<sup>3</sup>/s

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

### 3.4.11. Evénement de 2004

#### 3.4.11.1. DESCRIPTION

Cette « tempête » du 17 décembre 2004 est de type maritime ; elle a une genèse identique à celle de 1999 : une forte dépression (990 hPa) associée à des vents violents : la vitesse du vent la plus élevée a été de 155 km/h au Cap de la Hève (Source : Météo France).

L'impact sur les niveaux d'eau se fait ressentir essentiellement sur la partie aval de l'estuaire (à partir des environs de Heurteauville). La surcote à l'embouchure de l'estuaire est estimée à 1,37m (période de retour centennale) associé à un coefficient de marée moyen (71).

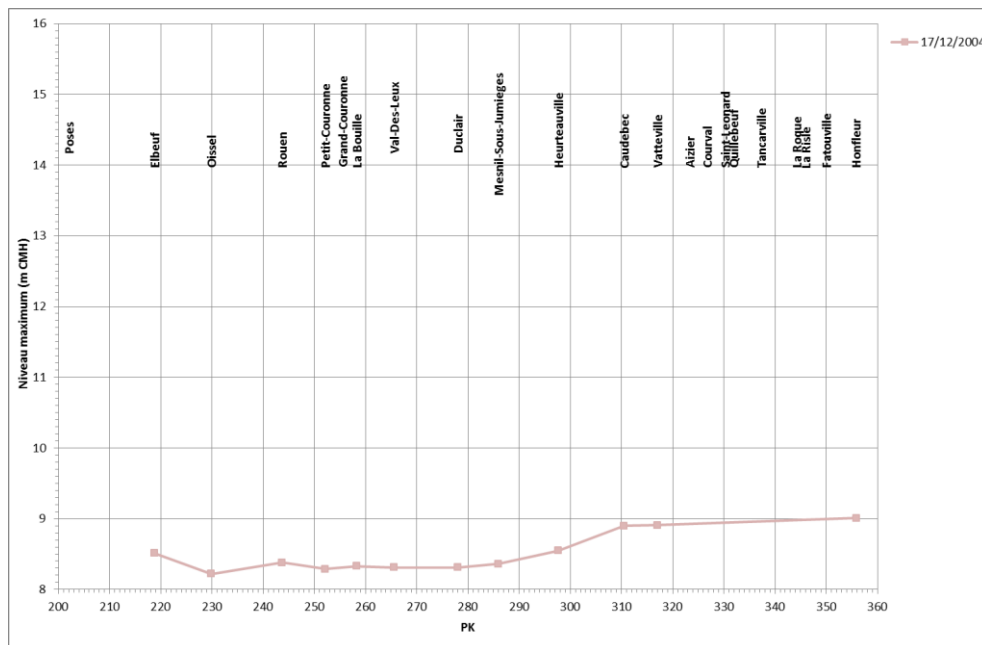
Le débit était plutôt faible (300 m<sup>3</sup>/s à Poses).

#### 3.4.11.2. CARACTERISTIQUES HYDROMETEOROLOGIQUES

**Tabl. 15 - Caractéristiques hydrologiques de l'événement de 2004 – Niveaux**

NIVEAUX MAXIMAUX		
STATION	NIVEAU D'EAU (M NGF)	NIVEAU D'EAU (M CMH)
<i>Austerlitz</i>		
<i>Rouen</i>	4,00	8,38
<i>Havre</i>	4,31	8,69

#### 3.4.11.3. GRAPHIQUE DE SYNTHESE



**Fig. 23. Niveaux d'eau maximums le long de l'estuaire (de Poses à Honfleur) pour l'événement de 2004**



---

Caractéristiques de l'événement :

- Coefficient de marée : 71
- Vent moyen : 140 km/h
- Pression atmosphérique : 990 hPa
- Surcote à l'embouchure : 1,37m
- Débit à Poses : 300 m<sup>3</sup>/s

### 3.4.12. Evénement de 2008

#### 3.4.12.1. DESCRIPTION

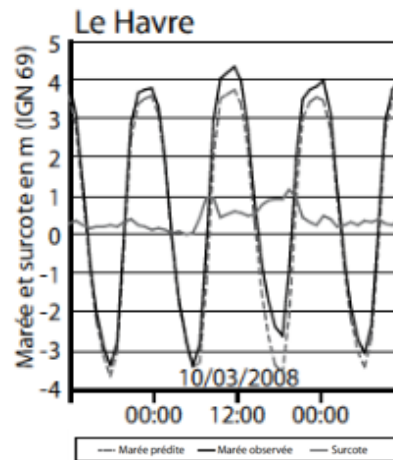
Cet événement est lui aussi de caractère maritime. Il résulte de la combinaison d'une marée de vive eau exceptionnelle (coefficient 106) avec la propagation d'une onde de tempête (pression atmosphérique de 975 hPa) accompagnée d'une houle d'Atlantique et d'un phénomène important de surcote.

La surcote maximale atteinte au Havre est de 1,18m ; ce niveau a été atteint pendant la marée basse. Quant aux surcotes au moment des pleines mers, elles oscillent entre 0,5 et 0,62 m (cf. Fig. 24.). Ces valeurs sont importantes mais ne sont pas qualifiées d'exceptionnelles car elles ont été plus élevées lors de précédents épisodes de tempêtes comme en janvier 1988 (Cariolet et al.).

Quant aux vents, ils sont également importants mais des tempêtes bien plus violentes ont été répertoriées sur le Nord-Ouest de la France et en Baie de Seine (février 1990, décembre 1999) Selon Météo France, les vitesses de vents atteintes pendant la tempête ont une occurrence de deux à trois ans. Cependant, la durée de l'épisode tempétueux est inhabituelle. Les vents violents ont en effet soufflé pendant une douzaine d'heures (Cariolet et al.).

Cet épisode n'est pas qualifié d'exceptionnel par les valeurs atteintes par les vents et les surcotes mais plutôt à cause de l'étendue du littoral touché.

Le débit de la Seine, plutôt faible à Poses (579 m<sup>3</sup>/s), n'a joué aucun rôle significatif.



**Fig. 24. Marée et surcote au Havre pendant l'événement de 2008**

#### 3.4.12.2. CARACTERISTIQUES HYDROMETEOROLOGIQUES

**Tabl. 16 - Caractéristiques hydrologiques de l'événement de 2008 – Niveaux**

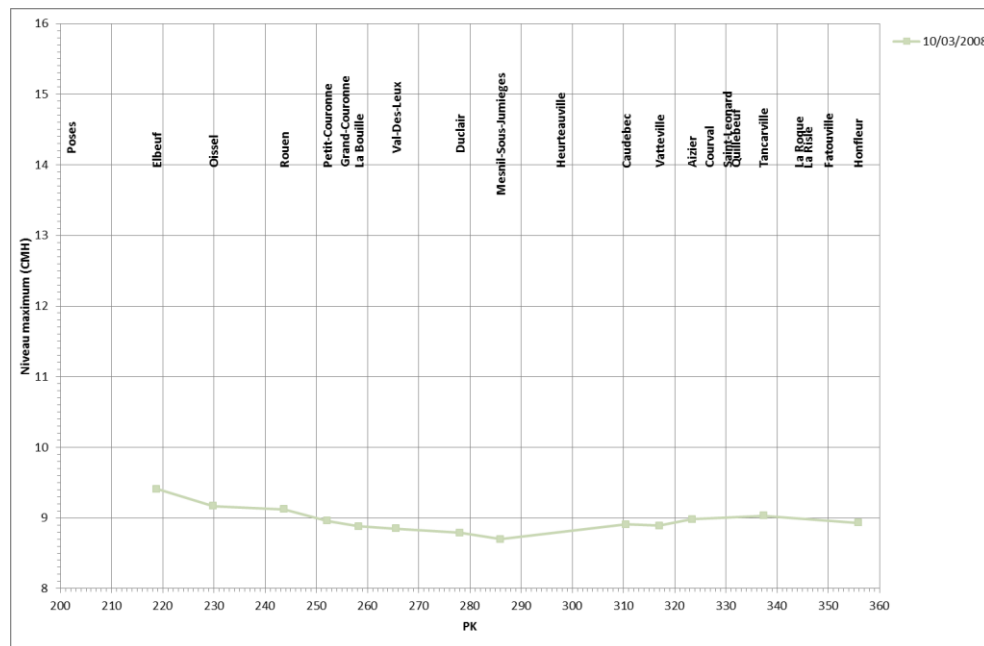
NIVEAUX MAXIMAUX		
STATION	NIVEAU D'EAU (M NGF)	NIVEAU D'EAU (M CMH)
<i>Austerlitz</i>		
<i>Rouen</i>	4,65	9,03
<i>Havre</i>	4,42	8,80

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

### 3.4.12.3. GRAPHIQUE DE SYNTHESE



**Fig. 25. Niveaux d'eau maximums le long de l'estuaire (de Poses à Honfleur) pour l'événement de 2008**

Caractéristiques de l'événement :

- Coefficient de marée : 106
- Pression atmosphérique : 975 hPa
- Surcote à l'embouchure : 1,18m
- Débit à Poses : 579 m<sup>3</sup>/s

### 3.4.13. Evénement de 2010

#### 3.4.13.1. DESCRIPTION

La tempête « Xynthia » est un phénomène de type maritime qui est qualifiée de tempête remarquable d'un point de vue météorologique ; elle est en effet moins exceptionnelle que la tempête de décembre 1999 en termes d'intensité des vents et de baisse de la pression atmosphérique. Par contre contrairement à 1999, la dépression coïncide avec une marée de vive eau.

Elle est du même type que celle de 2004 au niveau de l'estuaire de la Seine : combinaison d'une marée de vive eau exceptionnelle (coefficient 102) avec la propagation d'une onde de tempête (pression atmosphérique de 973 hPa).

Le débit de la Seine, 800 m<sup>3</sup>/s, est légèrement plus élevé qu'en 2004.

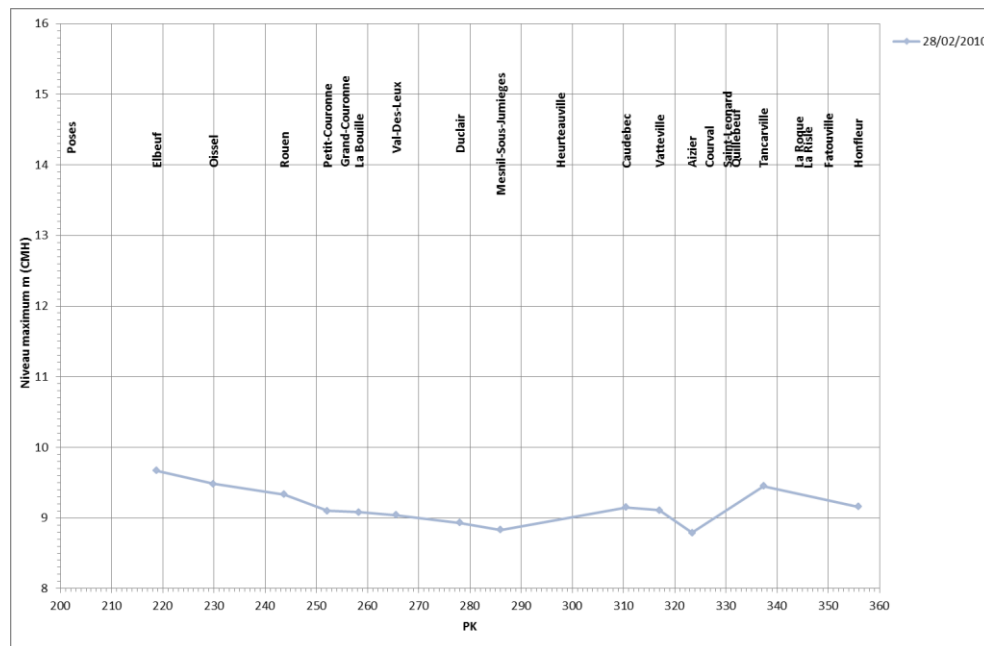
Sur l'ensemble du linéaire de l'estuaire de la Seine, les niveaux d'eau sont plus élevés qu'en 2004 (entre 20 et 30 cm). Au Havre, le niveau d'eau maximal est cohérent avec celui de 2004 ; la surcote générée à l'embouchure est de 0,87m.

#### 3.4.13.2. CARACTERISTIQUES HYDROMETEOROLOGIQUES

**Tabl. 17 - Caractéristiques hydrologiques de l'événement de 2010 – Niveaux**

NIVEAUX MAXIMAUX		
STATION	NIVEAU D'EAU (M NGF)	NIVEAU D'EAU (M CMH)
<i>Austerlitz</i>		
<i>Rouen</i>	4,95	9,33
<i>Havre</i>	4,46	8,843

### 3.4.13.3. GRAPHIQUE DE SYNTHESE



**Fig. 26. Niveaux d'eau maximaux le long de l'estuaire (de Poses à Honfleur) pour l'événement de 2010**

Caractéristiques de l'événement :

- Coefficient de marée : 102
- Vent moyen : 100 km/h
- Pression atmosphérique : 973 hPa
- Surcote à l'embouchure : 0,87m.
- Débit à Vernon : 836 m<sup>3</sup>/s

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

### 3.4.14. Conclusion

A l'issue de cette analyse des événements historiques, il ressort que sur l'estuaire de la Seine 3 types d'événements sont susceptibles d'engendrer des phénomènes d'inondation ou de débordement :

- Les événements de type fluvial qui sont engendrés plutôt par une crue de la Seine et qui impactent plutôt les niveaux d'eau à l'amont de l'estuaire (entre Poses et Val-des-Leux/Duclair) ;
- Les événements de type maritime assimilés à des tempêtes et engendrés par des phénomènes météorologiques (vent, pression atmosphérique) et un fort coefficient de marée ; ces derniers ont un impact plutôt sur les niveaux d'eau à l'aval de Heurteauville ;
- Enfin, les événements « fluvio-maritime » qui sont liés à la fois à un débit important de la Seine et une tempête. Ils impactent tout l'estuaire de la Seine cependant les niveaux d'eau sont moins élevés à l'amont de Rouen que lors d'un événement de type fluvial et à l'aval de Heurteauville que lors des événements de type maritime.

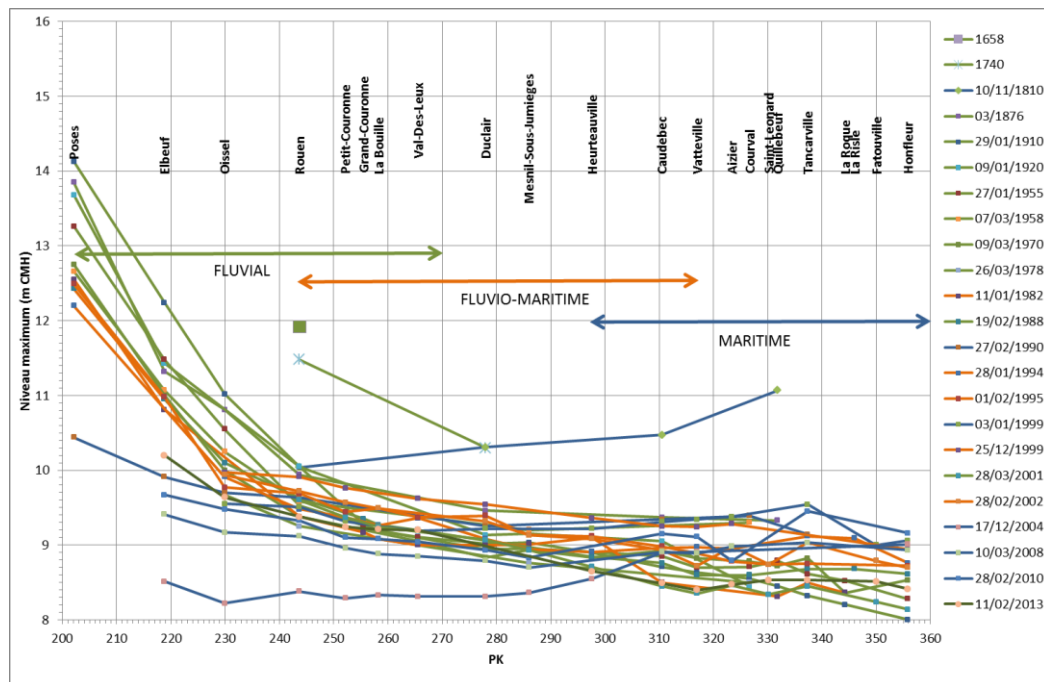


Fig. 27. Type d'événements

Tabl. 18 - Tableau récapitulatif des types d'événements selon les dates

TYPE D'EVENEMENT	DATE
Maritime	1658, 1990, Jan 1999, 2004, 2008, 2010
Fluvial	1740, 1876, 1910, 1920, 1955, 1958, 1970, 1978, 1988, 2001, 2013
Fluvio-maritime	1982, 1994, 1995, Décembre 1999, 2002

## 4. ANALYSES STATISTIQUES

### 4.1. ANALYSES STATISTIQUES DES FORCAGES

Les paragraphes suivants présentent la synthèse des différentes études statistiques et hypothèses émises dans le cadre des études hydrauliques précédentes réalisées sur l'estuaire.

Ces études concernent l'estimation des temps de retour associés aux débits des fleuves du secteur d'étude, aux surcotes marines, aux niveaux maximaux atteints aux différents marégraphes.

La synthèse de ces analyses statistiques permet de quantifier l'importance des différents événements étudiés et des facteurs les ayant générés. Cette analyse permet ensuite de définir les grandes familles d'événements hydrométéorologiques entraînant des niveaux d'eau importants sur le secteur d'étude.

Cette synthèse présente les analyses statistiques :

- des débits fluviaux,
- des coefficients de marée,
- des surcotes océaniques,
- des niveaux maximaux atteints aux différents marégraphes,
- des apports de la nappe.

#### 4.1.1. Débits aux stations limnimétriques

Pour chaque station, les analyses proviennent de la Banque Hydro.

##### 4.1.1.1. ANALYSE HYDROLOGIQUE

Une analyse hydrologique directe par une loi de Gumbel basée sur les débits maximaux annuels a été élaborée de manière actualisée pour différentes stations (Fig. 29 et Fig. 30). Il en ressort les éléments suivants :

**Tabl. 19 - Analyse hydrologique des débits annuels (m<sup>3</sup>/s)**

Période (ans)	Austerlitz (avant Lacs)	Austerlitz (après Lacs)	Poses (avant Lacs*)	Poses (après Lacs*)	Eure (Confl. Seine)	Risle (Confl. Seine)	Andelle (Confl. Seine**)	Cailly (Confl. Seine**)	Austreberthe (Confl. Seine**)
2	1094	1091	1650	1640	58	36	18	6.5	6
5	1576	1385	2225	2105	77	64	23	8.5	7.5
10	1831	1526	2400	2230	99	83	29	12	11
20	2037	1662	2565	2350	120	102	39	17	15
30	2155	1740	2660	2420	132	113	46	20	18
50	2300	1837	2775	2510	147	127	53	23	21
100	2500	1969	2930	2625	167	145	63	27	25
500	2962	2273	3290	2900	215	188	87	38	34

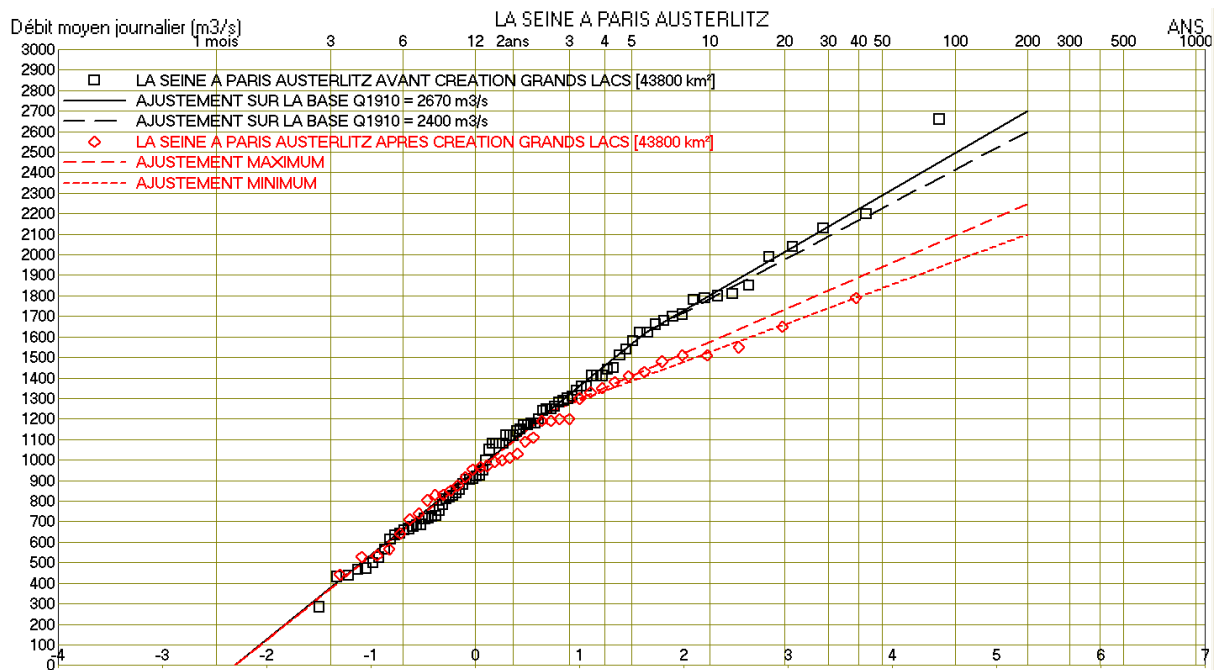
(\*) Estimations maximales

(\*\*) Estimations approximatives en s'inspirant de la Risle pour l'extrapolation aux fréquences rares

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2



**Fig. 28. Ajustements des débits de la Seine à Paris Austerlitz**

L'effet des Grands Lacs se ferait sentir à partir d'une crue de période de retour 3 ans (cf. chapitre 3.2.2.3).

En ce qui concerne le débit à Poses, nous avons en premier lieu établi une corrélation probabiliste par équi-fréquence entre les débits journaliers maximum annuels à Austerlitz (après création des Grands Lacs) et à Poses (échantillons permettant de disposer des débits sur une période commune).

Le résultat (Fig. 29) montre que la corrélation peut s'exprimer selon deux demies droites :

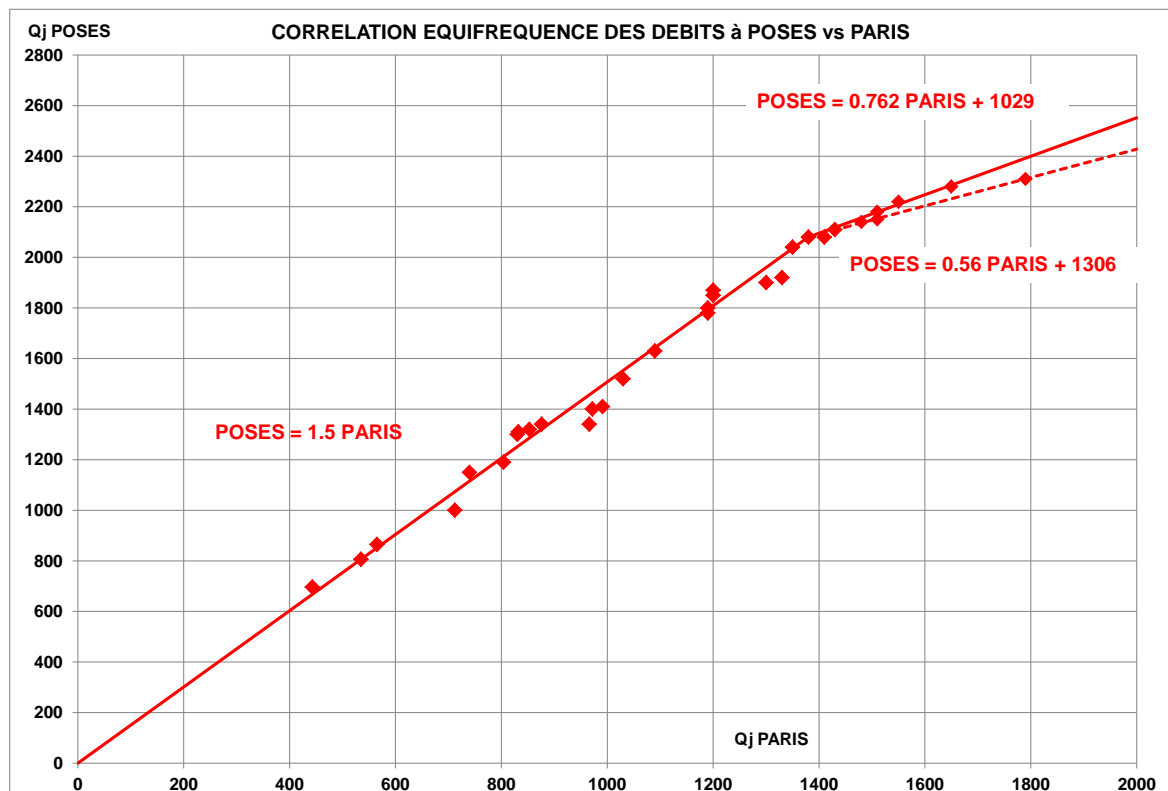
- La première indique une augmentation de 50% des débits caractéristiques de crue,
- La seconde indique une diminution de l'augmentation de débit vraisemblablement liée à des phénomènes de débordement et, donc, d'amortissement des ondes de crue, pour des débits supérieurs à 1380 m<sup>3</sup>/s à Paris. Nous avons envisagé deux corrélations différentes.



# Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

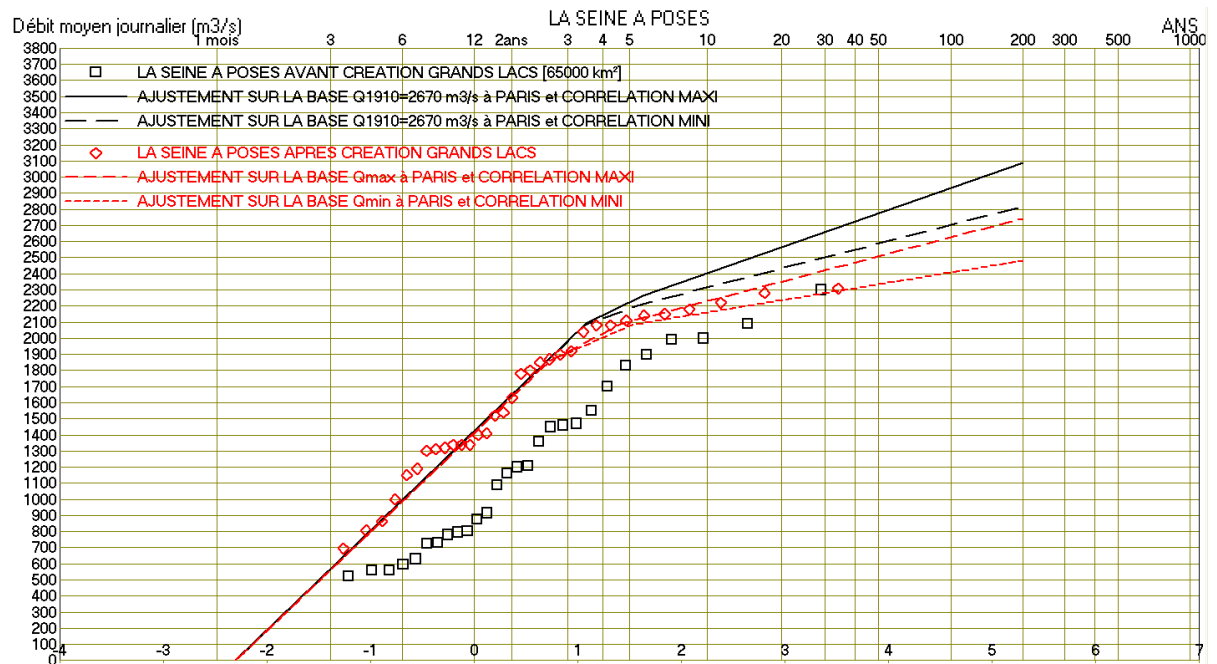
Objectif A

RAPPORT FINAL V2



**Fig. 29. Corrélation équi-fréquence débit Poses vs débit Paris**

La transformation des ajustements selon une loi de Gumbel des débits à Paris par ces différentes relations conduit au graphique suivant (Fig. 30):



**Fig. 30. Ajustements des débits de la Seine à Poses**

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

Il semble que les débits à Poses avant création des Grands Lacs aient été sous-estimés car ils se positionnent sous les débits postérieurs à la création.

Par ailleurs, on voit qu'une estimation à 2930 m<sup>3</sup>/s de la crue de 1910 la situe centennale alors qu'une estimation de 3500 m<sup>3</sup>/s en fait une crue supérieure à la crue millénale ce qui est peu vraisemblable car les apports intermédiaires n'ont pas été exceptionnels.

### 4.1.1.2. ESTIMATION DES PERIODES DE RETOUR DES EVENEMENTS REFERENCES

Les crues doivent donc être référencées selon deux époques, avant et après l'aménagement des Grands Lacs. Le tableau (Tabl. 20 - ) suivant synthétise les débits mesurés et les occurrences selon le Tabl. 19 - .

**Tabl. 20 - Débits mesurés et occurrence pour les événements historiques (Seine)**

EVENEMENTS	DÉBIT À AUSTERLITZ (M <sup>3</sup> /S)	PERIODE DE RETOUR ESTIMEE (ANNEES)
1872	1820	10
1876	2000	18
1882	1820	10
24/02/1889	1730	8
28/01/1910	2670(*)	180
10/01/1919	1830	10
05/01/1920	1990	17
06/01/1924	2380	62
08/01/1926	1800	9
02/12/1930	1820	10
13/02/1944	1665	6
16/02/1945	2050	21
23/01/1955	2140	28
19/01/1959	1860	11
27/02/1970	1680	6

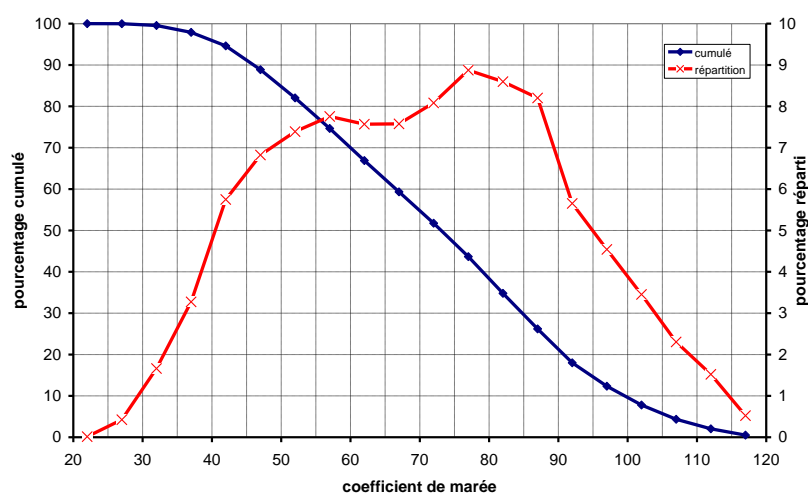
EVENEMENTS	DÉBIT À POSES (M <sup>3</sup> /S)	PERIODE DE RETOUR ESTIMEE (ANNEES)
25/02/1977	1870	3
05/04/1978	2040	4
16/01/1982	2310	16
24/12/1982	2080	4
15/02/1988	2180	8
12/01/1994	2080	4
04/02/1995	2220	9
01/01/2000	2140	6
26/03/2001	2280	13
04/03/2002	1900	3
08/01/2003	1920	

(\*) : Voir chapitre 3.2.1.3 sur la crue de 1910.

## 4.1.2. Coefficients de marée

Une étude de Gougenheim réalisée en 1953 définit la répartition statistique des coefficients de marée. Cette étude se base sur l'analyse des marées sur 17 années consécutives.

Les résultats obtenus en termes de pourcentages relatifs et cumulés d'apparition des coefficients de marée sont présentés dans le graphique et le tableau suivants.



**Fig. 31. Répartition statistique des coefficients de marée**

**Tabl. 21 - Pourcentages relatifs et cumulés d'apparition des coefficients de marée**

Coefficient de marée	Moyenne annuelle	Minimum	Maximum	Fréquence moyenne (%)	Dépassement
20 à 24	0.1	0	2	0.01	100.00
25 à 29	3.0	0	16	0.43	99.99
30 à 34	11.7	0	20	1.66	99.56
35 à 39	23.1	4	33	3.27	97.90
40 à 44	40.6	27	61	5.75	94.62
45 à 49	48.2	29	58	6.82	88.87
50 à 54	52.2	42	67	7.39	82.05
55 à 59	54.7	45	69	7.76	74.66
60 à 64	53.4	48	63	7.57	66.90
65 à 69	53.5	44	64	7.58	59.33
70 à 74	57.1	50	70	8.08	51.76
75 à 79	62.6	45	76	8.87	43.67
80 à 84	60.7	42	78	8.60	34.80
85 à 89	57.9	42	79	8.20	26.20
90 à 94	39.9	18	61	5.65	18.00
95 à 99	32.1	14	58	4.54	12.34

Coefficient de marée	Moyenne annuelle	Minimum	Maximum	Fréquence moyenne (%)	Dépassement
100 à 104	24.4	13	51	3.45	7.80
105 à 109	16.3	4	25	2.30	4.35
110 à 114	10.7	0	19	1.52	2.04
115 à 119	3.7	0	12	0.52	0.52

### 4.1.3. Niveaux extrêmes et surcotes océaniques

Le SHOM et le CETMEF ont publié en 2012 les « statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique) ».

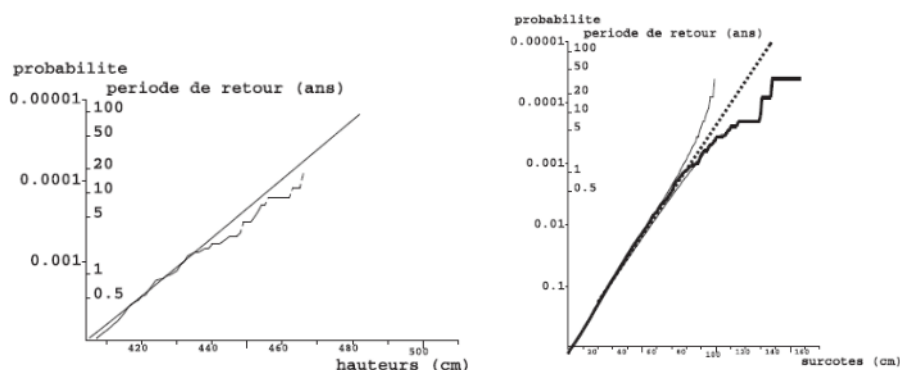
Dans cet ouvrage, les définitions suivantes sont utilisées :

- La surcote/décote instantanée est la différence, à un instant  $t$ , entre la hauteur d'eau observée et la hauteur d'eau prédite. On parle de surcote quand cette différence est positive, et de décote quand elle est négative. La surcote/décote a principalement une origine météorologique : elle est générée, lors du passage de dépressions ou d'anticyclones, par les variations de pression atmosphérique et par les vents. Elle peut avoir également d'autres origines : vagues, sèches, tsunamis...
- La surcote de pleine mer est la différence entre la hauteur de pleine mer observée et la hauteur de pleine mer prédite (marée astronomique), les instants d'occurrence de ces deux niveaux pouvant être décalés dans le temps. De même, la décote de basse mer est la différence entre la hauteur de basse mer observée et la hauteur de basse mer prédite.

Cet ouvrage précise d'autre part que pour étudier les surcotes/décotes extrêmes, les variables appropriées sont la surcote de pleine mer et la décote de basse mer par rapport à la pleine mer prédite, et non les surcote/décote instantanées. Ainsi, on s'affranchit par définition des effets de déphasage entre l'observation et la prédiction.

Nous utiliserons ces définitions dans le reste du document.

La méthode procède par renouvellement avec ajustement à une loi Log. Cette loi est usuellement employée pour les caractérisations des événements hydrologiques et hydrauliques. Les résultats obtenus à l'aide de cette loi sont proches de ceux proposés par la loi de Weibull. Les statistiques en niveaux extrêmes sont fournies au Havre sur la Fig. 32.



**Fig. 32. Statistiques des niveaux au Havre, SHOM 2012 (à gauche période de retour des hauteurs observées ; à droite période de retour des surcotes)**

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

Le Tabl. 22 - présente les périodes de retour des niveaux extrêmes et des surcotes à la balise A estimées depuis ce document.

**Tabl. 22 - Période de retour des niveaux extrêmes et des surcotes à la Balise A (cm NGF)**

Balise A	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Niveaux extrêmes surcote incluse (m NGF)	453	461	472	481
Niveaux extrêmes (m CMH)	888	903	912	916
Surcote	104	112	125	132

La méthode procède par renouvellement avec ajustement à une loi de Gumbel. Cette loi est usuellement employée pour les caractérisations des événements hydrologiques et hydrauliques. Les résultats obtenus à l'aide de cette loi sont proches de ceux proposés par la loi de Weibull.

### 4.1.4. Pression Atmosphérique

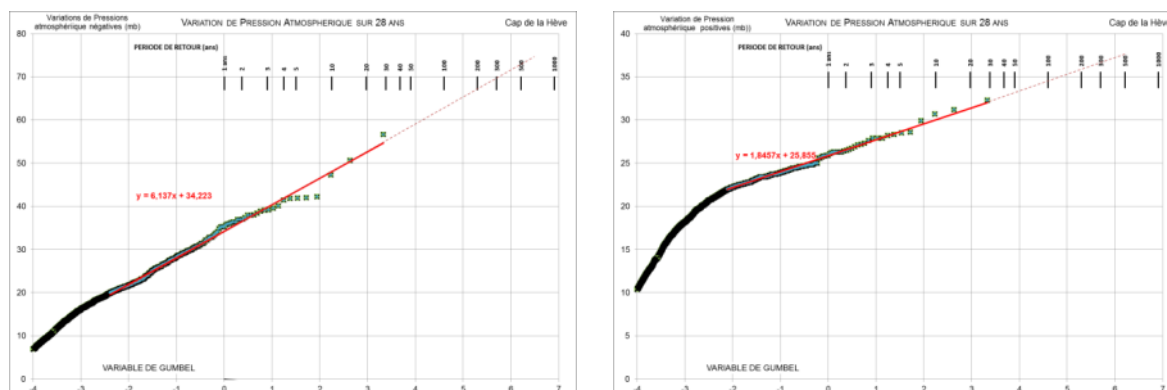
La Pression Atmosphérique est fournie au Cap de la Hève. Nous disposons de 28 ans de données entre 1985 et 2013 afin d'établir une loi de comportement statistique de la pression atmosphérique à la variation autour de la pression atmosphérique moyenne de 1013 mb, noté  $\delta Pa$ .

Le Tabl. 23 - présente quelques statistiques sur ces données.

**Tabl. 23 - Statistique des mesures de pression atmosphérique au Havre**

Nombre d'enregistrements	Valeur moyenne	Valeur minimale	Valeur maximale	Ecart moyen	Ecart type
2412	1,5	-56,6	32,3	9,80	12,26

Pour établir une statistique des mesures de pression, il convient de considérer les événements de basse pression et de haute pression de manière indépendante. On établit ainsi un graphe de Gumbel (loi Log des valeurs de dépassement) sur les valeurs positives de la variation de pression et un graphe de Gumbel pour les valeurs négatives (cf. Fig. 33) et un tableau des périodes de retour (Tabl. 24 -).



**Fig. 33. Loi de Gumbel de la variation de Pression Atmosphérique. A gauche les valeurs négatives (dépression), à droite les valeurs positives (surpression)**

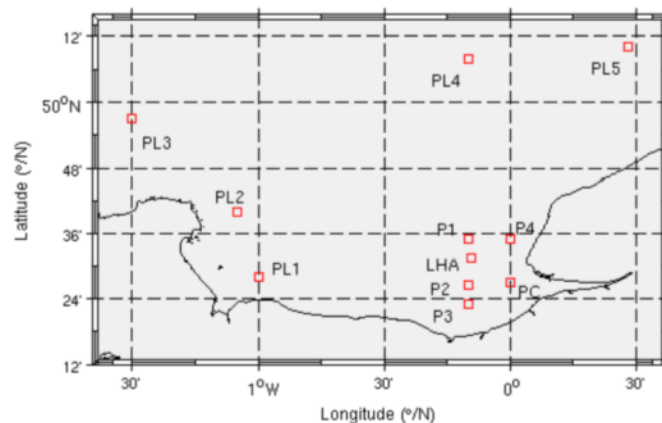
**Tabl. 24 - Période de retour des variations de pression atmosphérique (mb)**

	1 an	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	500 ans
Variation de Pression Atmosphérique négative - dépression (mb)	34,22	43,43	48,03	52,45	58,17	62,45	72,36
Variation de Pression Atmosphérique positive - surpression (mb)	25,85	28,62	30,01	31,34	33,06	34,35	37,32

Ces graphes permettent d'établir une loi de comportement probabiliste de la pression atmosphérique et d'extrapoler les valeurs sur des périodes plus longues.

#### 4.1.5. Vent

Le vent est disponible en 6 stations (cf. chapitre 0, Recueil des données). Nous avons ajouté les vents de la station PC extraite de l'étude Globocéan de 2012 issue de modèle météorologique.



**Fig. 34. Position des stations météorologiques de l'étude Globocéan, 2012**

##### 4.1.5.1. PARTICULARITE DES STATIONS

La station du Cap de la Hève se trouve en bordure de falaise, localisée à 100m de hauteur. Comme nous le verrons, la direction des vents est sensiblement cohérente avec les autres stations proches du Havre (sauf Octeville). Par contre, l'intensité du vent est très importante du fait de l'altitude. Il est possible d'utiliser des formules empiriques pour ramener le vent à une altitude de 10m. Nous avons retenu la loi simplifiée utilisée couramment en mer  $\frac{U(z)}{U(10m)} = \left(\frac{z}{10}\right)^p$ ,  $p = 0,16$  (ce qui donne un coefficient d'abattement de 1,445 entre le vent à 100m et à 10m), du fait de la cohérence du vent retraité avec les autres stations.

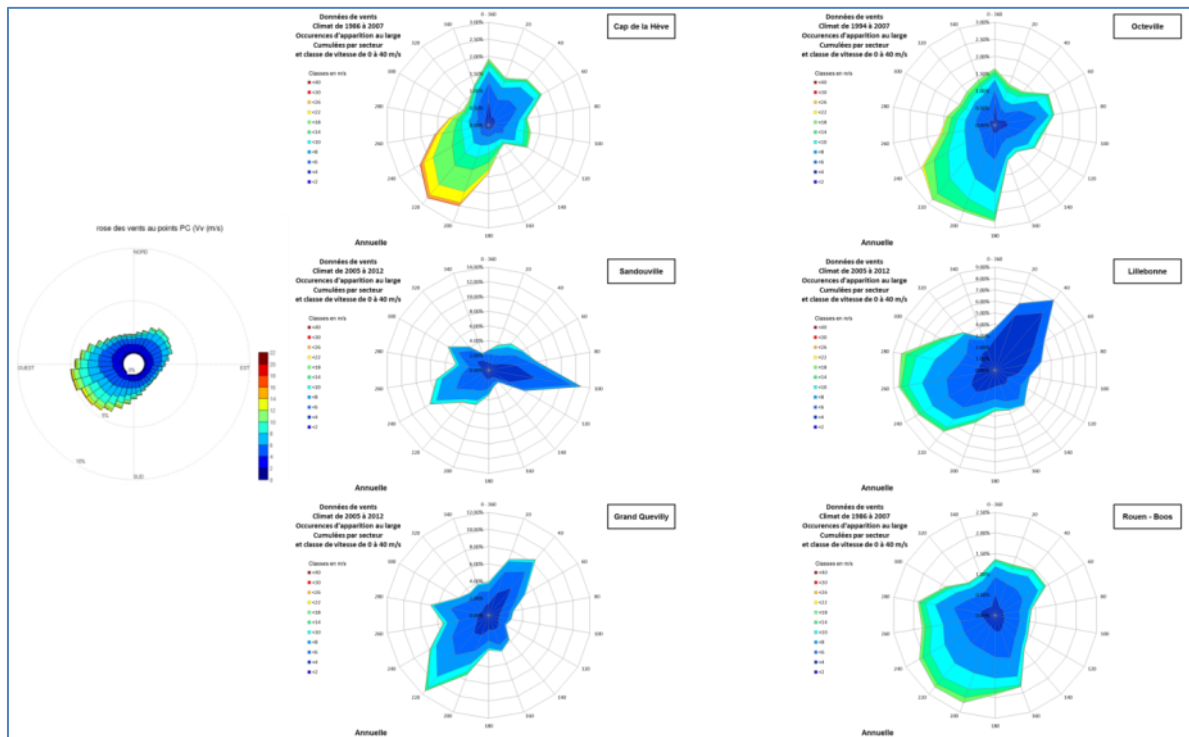
La station d'Octeville se situe à 94m d'altitude mais à l'intérieur des terres, 10m au-dessus du sol. Il n'est donc pas nécessaire de réaliser une conversion du vent.

Les stations d'Air Normand (Sandouville 6m/mer, Feu de Lillebonne 5m/mer, Grand Quevilly 8m/mer) portent sur une période assez courte 2005-2012.

La station PC est issue d'une reconstitution par modèle météorologique des vents sur la période 1992-2011.

## 4.1.5.2. ROSES DES VENTS

Les roses des vents sont présentées en Annexe 1. Elles sont réalisées sur l'ensemble des données et restreintes sur deux périodes de 6 mois (été/hiver) pour identifier les effets saisonniers. La Fig. 35 présente la synthèse des 7 roses des vents globales.



**Fig. 35. Roses des vents aux 7 stations**

Il apparait les éléments suivants :

- La station de Sandouville est fortement différente des autres stations et donc considérée comme non représentative ; cette différence est liée à la position de la station située à proximité de falaises qui conditionnent ainsi fortement la propagation du vent (cf. Fig. 2 pour la localisation).
- La station de Lillebonne présente un axe principal un peu différent (orienté 30° plus à l'Ouest) du fait de sa position dans un méandre sans falaise à proximité.
- Les autres stations sont en assez bonne cohérence, avec un axe principal (vents les plus forts et probables) orienté entre le 220° et le 240°N et un axe secondaire orienté entre 40° et 60°N
- Pour l'ensemble des stations, les variations saisonnières ne présentent pas de fortes différences. Sur Rouen, on note une différence d'orientation S-SW en hiver vers W en été.
- Les vents extrêmes sont principalement en hiver.

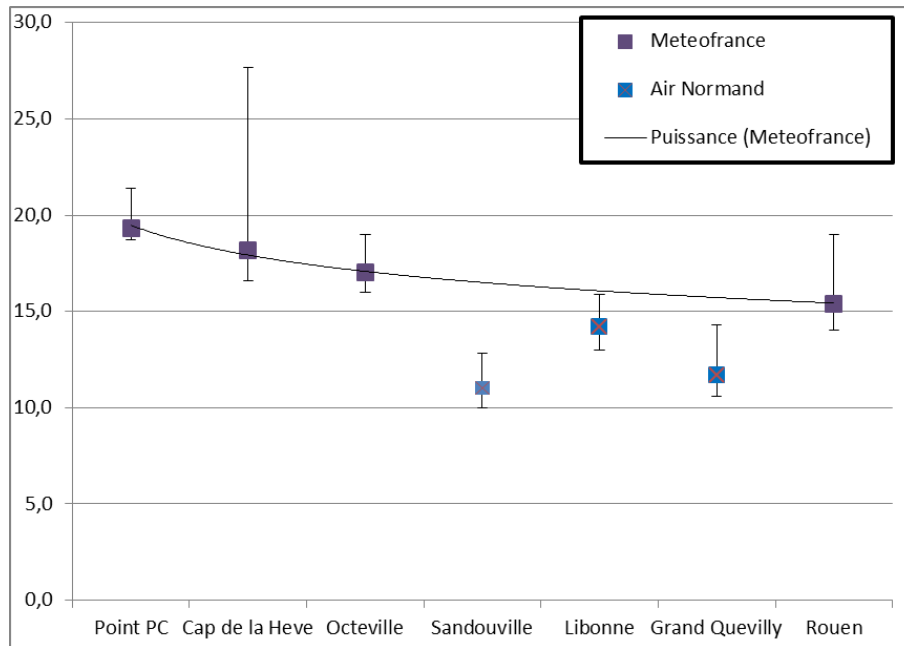
## 4.1.5.3. CARACTERISTIQUES DES VENTS

Les vents peuvent être analysés depuis le point PC (mer) à Rouen. La Fig. 36 présente le profil en long des amplitudes des vents moyens des 30 événements les plus importants observés sur la période de mesure et les enveloppes des écarts négatifs et positifs.

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

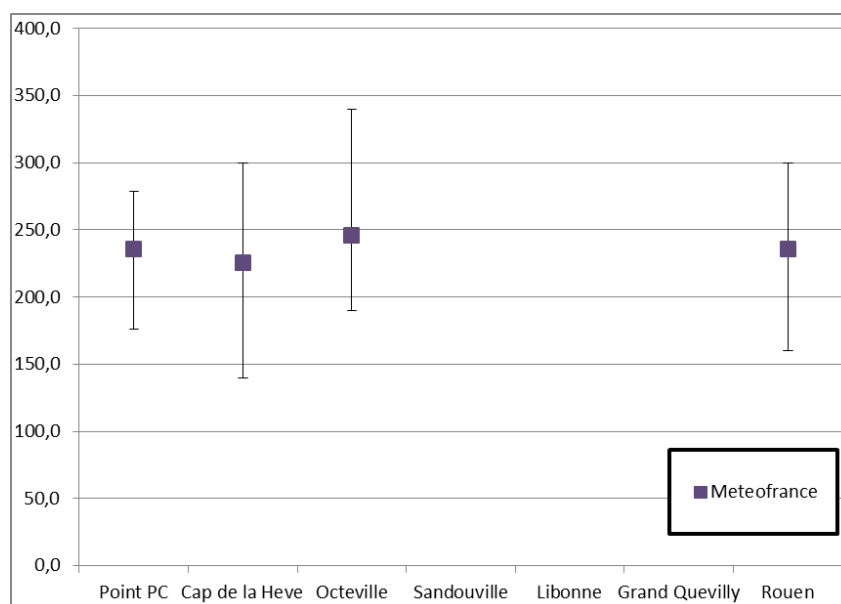


**Fig. 36. Profil en long des vents moyens - amplitudes**

Ce graphique montre une bonne cohérence dans le profil en long entre le point en mer PC et les points Météo France. Les points Air Normand, basés sur une période de mesure courte, ont des intensités plus faibles. Une loi de puissance est cohérente avec l'amortissement des coups de vents d'ouest lors de leur entrée dans les terres.

On remarque que la station du Cap de la Hève présente un coup de vent exceptionnellement fort (26 février 1990, 27,6 m/s). Cet événement n'a pas été enregistré sur les autres stations et n'apparaît donc pas.

La Fig. 37 présente le même graphique pour les directions du point PC et des points Météo France. On note la grande cohérence des directions moyennes mais aussi des écarts.

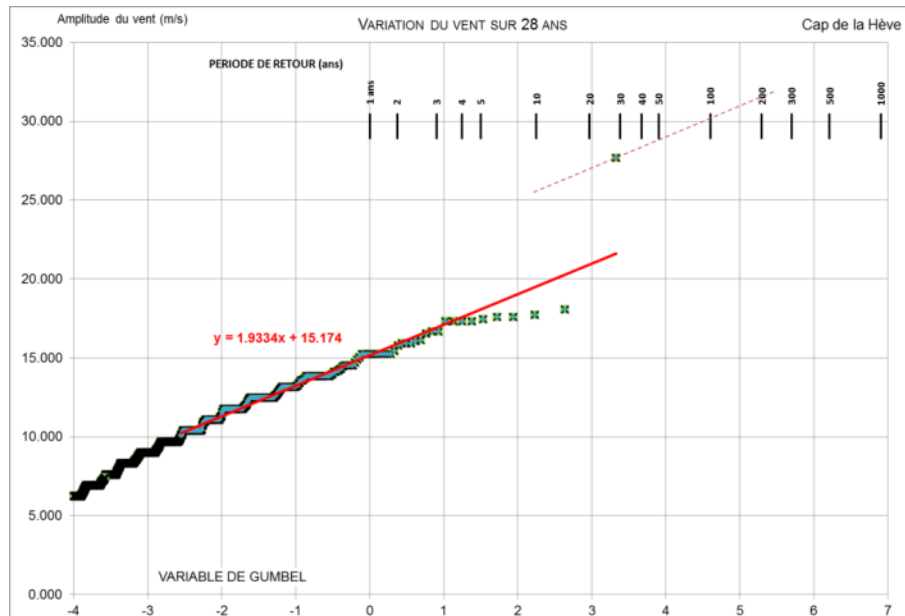


**Fig. 37. Profil en long des vents moyens - directions**



### 4.1.5.4. ANALYSE STATISTIQUE DU VENT AU CAP DE LA HEVE

Les mesures de vent au Cap de la Hève sont présentées de manière statistique sur un graphe de Gumbel (loi des valeurs de dépassement) sur la Fig. 38.



**Fig. 38.** Graphe de Gumbel de l'amplitude du vent au cap de la Hève

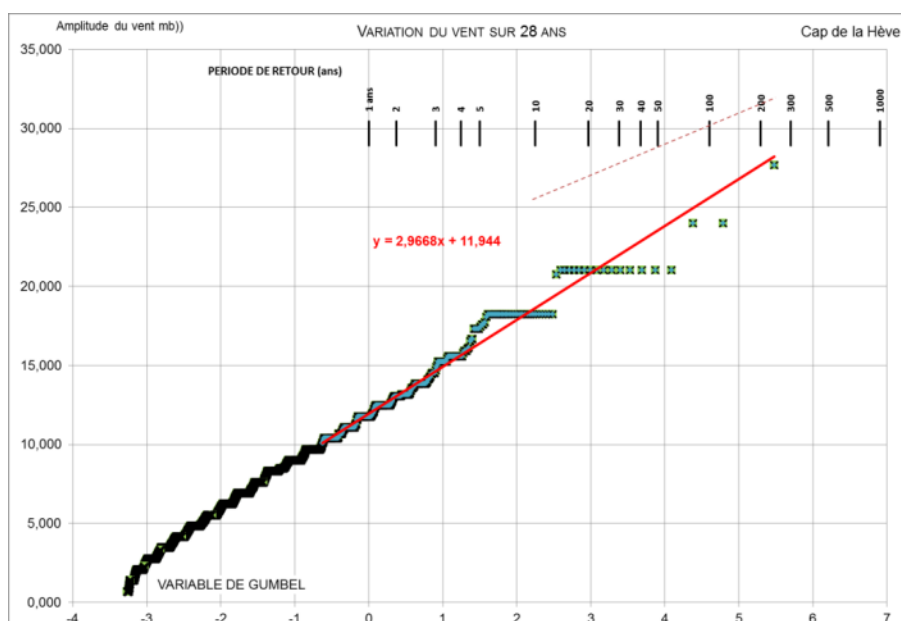
Cette analyse est clairement imprécise, car l'échantillonnage disponible des données de Météo France est effectivement limité voire imprécis. Le vent de la tempête de février 1990 est ainsi difficile à positionner. Pour autant, nous savons que d'autres événements semblables ont été référencés depuis 1880 et même avant. Météo France ne publie pas de statistiques de ce type, il est donc là encore impossible de se référer à des données complémentaires.

A défaut, nous avons intégré dans l'analyse les éléments collectés sur revue bibliographique par le GIPSA dans le fichier « 20120914 Base tempête et inondation embouchure.xls ». Les données en Force Beaufort ont été intégrées par leur valeur centrale selon la loi proposée :  $v = 0,8334 B_f^{3/2}$ , avec  $v$  en m/s. Les résultats sont synthétisés dans le graphe suivant (Fig. 39).

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2



**Fig. 39.** Graphique de Gumbel de l'amplitude du vent au cap de la Hève, complété par des données bibliographiques

Il ressort alors que l'événement du 26 février 1990 resterait le plus fort connu avec une période de retour estimée à 240 ans.

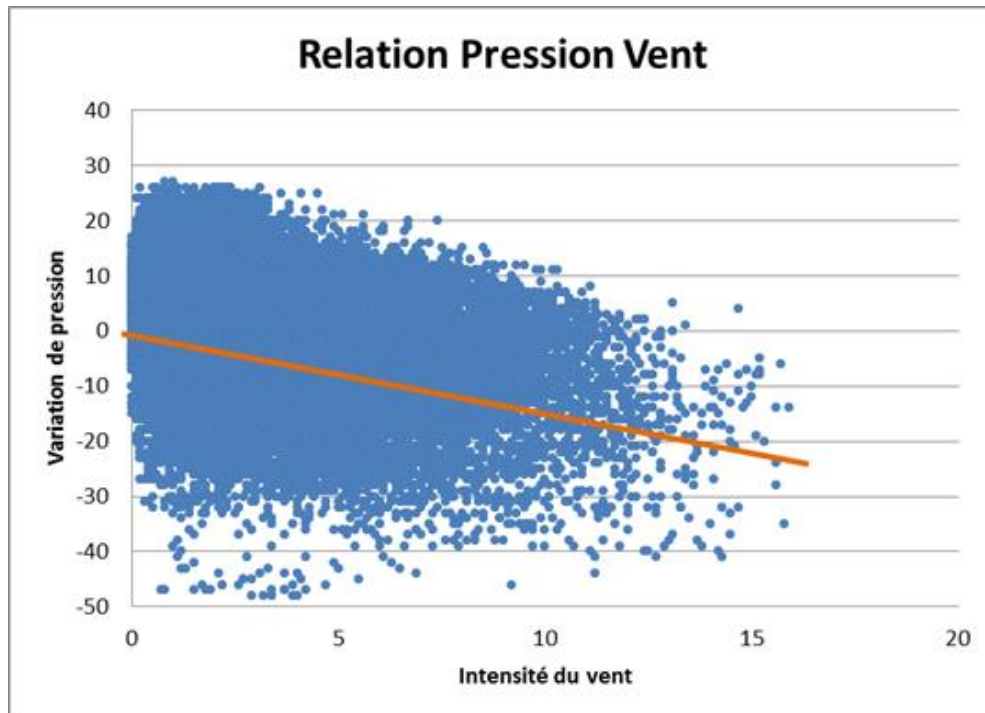
**Tabl. 25 - Période de retour de l'intensité du vent au cap de la Hève – vent moyen sur 3h, réduit à 10m (m/s)**

Période de retour en an	1	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
Vent moyen sur 3h, à 10m en m/s	11,9	14,0	16,7	18,8	20,8	23,6	25,6	27,6	30,4	32,4

### 4.1.5.5. RELATION VENT-PRESSION

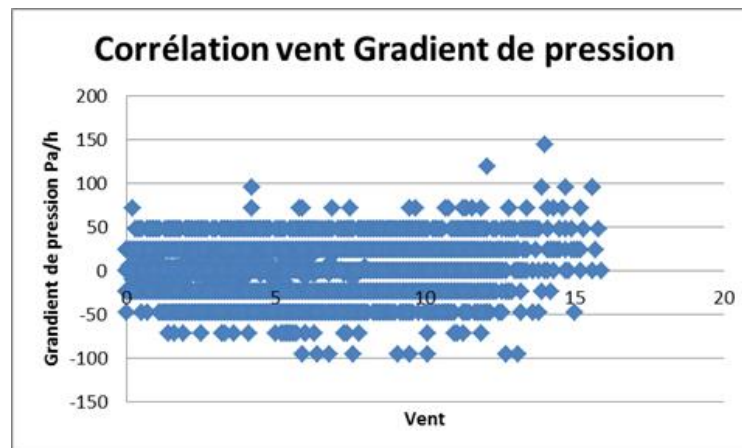
La relation entre pression atmosphérique et vent semble au premier abord une évidence. Nous présentons sur le graphique suivant (Fig. 40) la relation entre la pression atmosphérique au Havre et le vent au cap de la Hève. Si une certaine relation apparaît, elle n'est pas directe.

Ainsi, on constate clairement sur ce graphique qu'il est possible d'observer des dépressions fortes sans vent et les vents les plus forts ne se font pas au moment des dépressions les plus fortes. La seule tendance identifiable est que les vents les plus forts se font plutôt en période de dépression au sens large du terme.



**Fig. 40.** Relation pression au Havre – intensité du vent au cap de la Hève

Les raisons à ce phénomène sont principalement que les vents forts apparaissent sur les fronts des dépressions donc en chute du baromètre. Quand le front est passé, la pression est basse mais le vent a chuté. Ainsi, il existerait a priori plutôt une relation entre les vents et le gradient de la pression mais cela n'est aussi pas aussi simple à établir comme le montre le graphe suivant (Fig. 41).

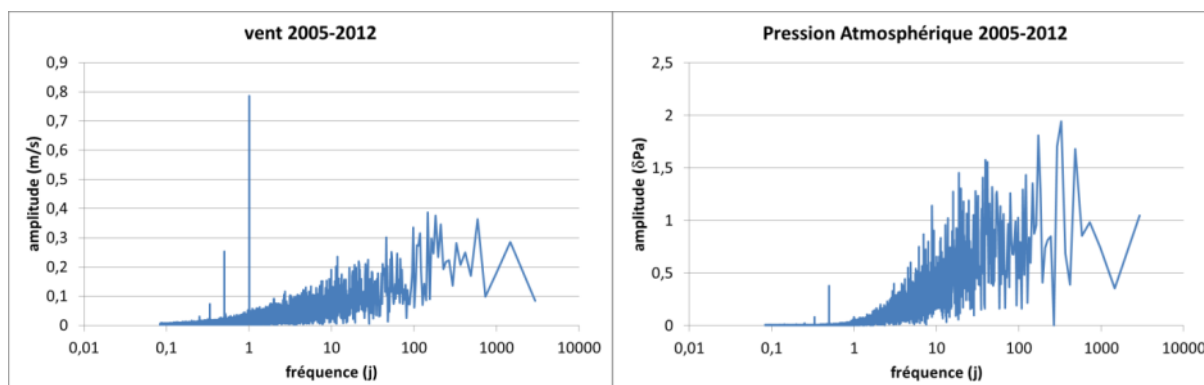


**Fig. 41.** Relation gradient temporel de la pression au Havre – intensité du vent au cap de la Hève

Un autre exemple de la faible relation entre le vent et la pression repose sur les éléments suivants :

- Lors de la tempête de février 1990 avec un vent de 27,7m/s, la pression au Havre est de 1003 mb et le lendemain matin elle est au plus bas (998,6 mb) soit une dépression de 14,4mb seulement.
- La dépression la plus faible enregistrée avec 970mb le 10 février 2013 présente un vent entre 4 et 5 m/s.

Dans les faits, vent et pression ne suivent pas les mêmes fréquences. L'analyse spectrale des deux signaux est présentée sur le graphique suivant.



**Fig. 42. Transformée de Fourier des signaux de vent (à gauche) et de pression (à droite)**

On remarque que :

- la composante dominante du vent est à 24h alors qu'à cette fréquence la pression ne présente aucun pic.
- La composante semi-diurne (12h) correspondant au cycle jour / nuit s'observe sur les deux paramètres.
- Les composantes saisonnières (que l'on peut assimiler aux fréquences supérieures à 1 mois) sont importantes notamment pour la pression.
- Les composantes intermédiaires dominantes sont de 11-12 jours pour le vent et 8, 15 et 19 jours pour la pression.

Au-delà des effets saisonniers, les fréquences des pics d'énergies sont donc bien différentes entre le vent et la pression atmosphérique, montrant un découplage de ces deux phénomènes. Ainsi, si à l'évidence il existe sur le principe un lien entre pression atmosphérique et vent, la relation est extrêmement complexe et ne peut être limitée à une analyse directe.

Nous pouvons donc considérer comme indépendants en première approximation les facteurs primaires que sont la pression atmosphérique et le vent pour les besoins de la présente étude.

### 4.1.6. Apports de nappes

#### 4.1.6.1. CARACTERISTIQUES DE LA NAPPE DE LA CRAIE

La nappe de la craie constitue l'aquifère le plus important du bassin parisien. La craie est une roche calcaire qui trouve son origine dans l'accumulation de très nombreux restes de microfossiles d'algues ayant sédimentés au crétacé supérieur. D'épaisseur variable (jusqu'à plusieurs centaines de mètres), la couche crayeuse est recouverte, sur les plateaux, d'une formation superficielle discontinue de limons et d'argiles et repose sur une couche argilo-marneuse imperméable bloquant l'écoulement de l'eau vers les niveaux inférieurs.

La nappe est alimentée par l'eau de pluie qui traverse le sol et s'infiltre dans la craie, roche qui constitue l'essentiel du sous-sol de la Haute-Normandie. Etant limitée par des couches imperméables d'argiles et de marnes (mélange d'argile et de calcaire), l'eau finit par s'accumuler dans les fissures. Le "plancher" de la nappe pourrait être comparé à un toit en pente très douce dont les deux pans s'écouleraient, pour l'un vers la Seine, pour l'autre, vers la côte, avec une légère pente descendante des rebords du Pays de Bray vers la pointe du Bec-de-Caux.

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

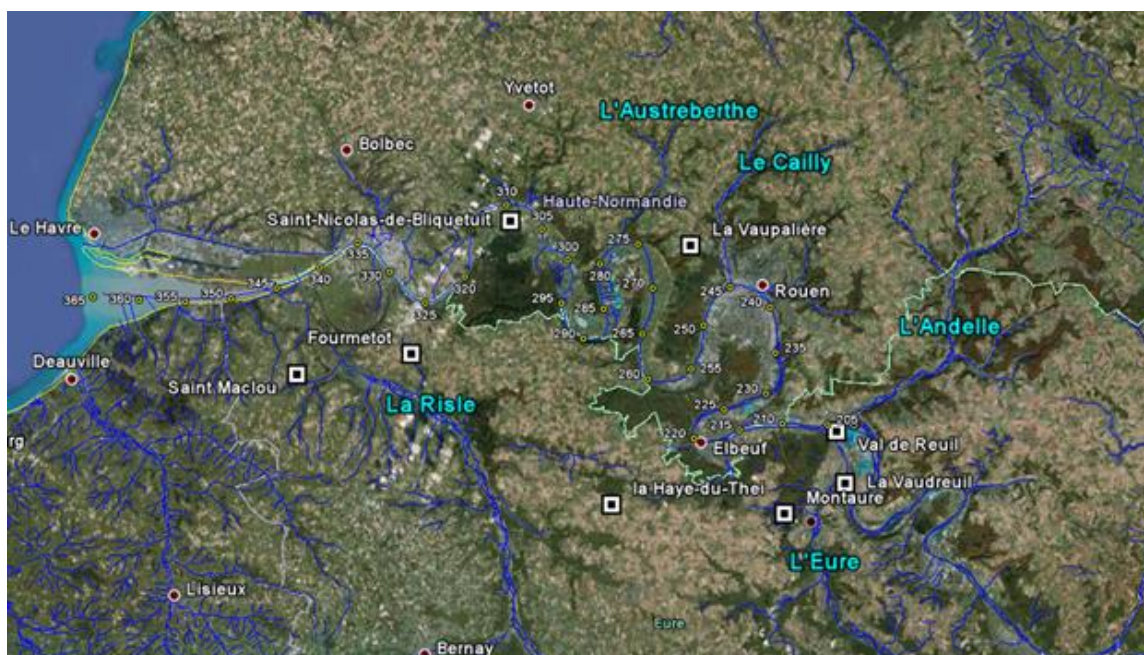
Objectif A

RAPPORT FINAL V2

Pour atteindre des points de sortie, l'eau tend à se frayer un chemin horizontalement à travers les fissures. Lorsque ces fissures ont été élargies par la dissolution de la craie, l'eau s'écoule en de véritables rivières souterraines complétant le faible réseau hydrographique de surface qui caractérise les régions calcaires.

### 4.1.6.2. DONNEES ADES

Les données du réseau piézométrique ADES ont été relevés sur 7 stations, localisée sur la Fig. 43 et présentées dans le Tabl. 26 - .



**Fig. 43. Carte des points piézométrique du réseau ADES (rectangles)**

**Tabl. 26 - Données du réseau ADES**

Localisation	Bassin Versant	Coordonnées	Altitude	Profondeur	Date de démarrage	Date de fin
Base de loisirs Val-de-Reuil	Eure	1,2120E 49,3054N	8m	20.5m	10/01/2008	21/04/13
Golf de Le Vaudreuil	Eure	1,2215E 49.2525N	9m	34,25m	24/05/85	18/02/08
Puits Ecrosville à Montauve	Eure	1,0893E 49.22405N	136m	42,4m	12/10/67	06/12/12
Château du Parquet à La Vaupalière	Le Cailly	0,9822E 49,478N	115m	98m	29/01/68	21/04/13
Les Capucins à Saint-Nicolas-de-Bliquetuit	Risle	0,7225E 49,5178N	4m	10m	03/06/08	21/04/13
Château à Saint-Maclou	Risle	0,4115E 49,3605N	120m	39,8m	19/01/71	21/04/13
Château du Hamel à Fourmetot	Risle	0,581E 49,3802N	112m	67,5m	26/01/71	21/04/13
La Haye-du-Theil	Risle	0,8761E 49,2344N	160m	50.2m	02/03/06	21/04/13

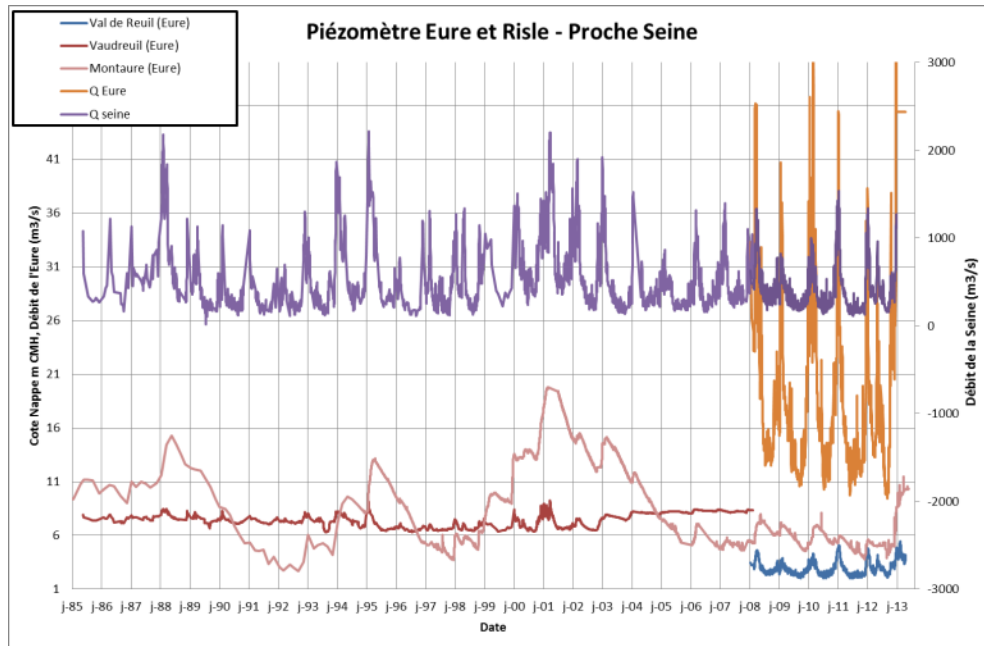
## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

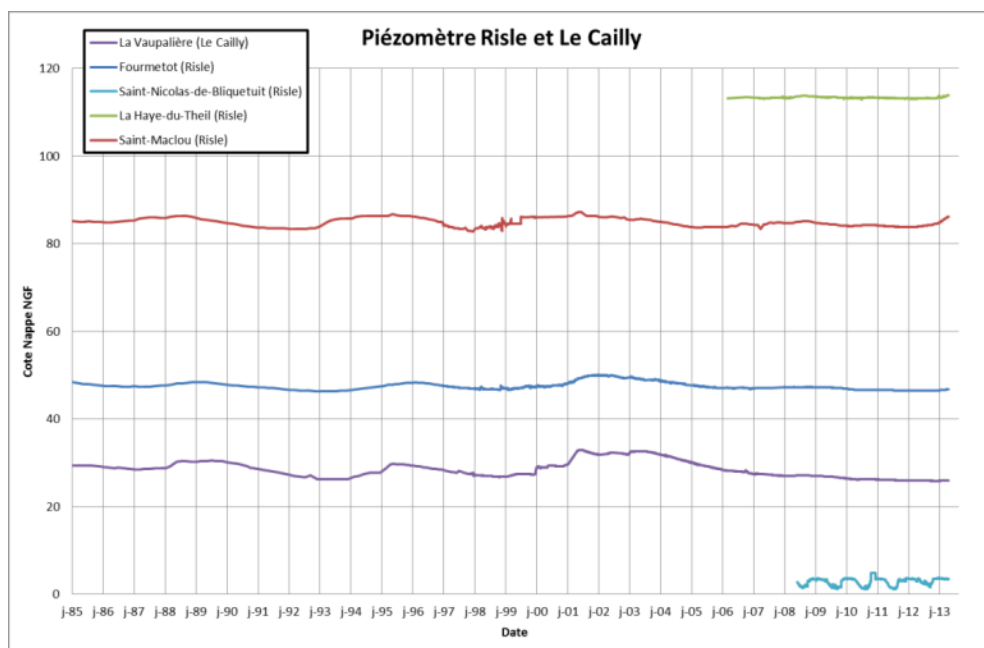
RAPPORT FINAL V2

Les données des piézomètres ont été regroupées en 2 ensembles et sont présentées sur la Fig. 44 et la Fig. 45 :

- Ceux situés dans la vallée de l'Eure (Val-de-Reuil, Le Vaudreuil, Montaure),
- Ceux situés sur le bassin de la Risle et du Cailly (La Vaupalière, Saint-Maclou, Fourmetot, La Haye-du-Theil, Saint-Nicolas-de-Bliquetuit).



**Fig. 44. Enregistrements des niveaux des piézomètres sur le secteur de l'Eure et de la Risle - Débits de la Seine et de l'Eure**



**Fig. 45. Enregistrements des niveaux des piézomètres sur le secteur de la Risle et du Cailly**

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

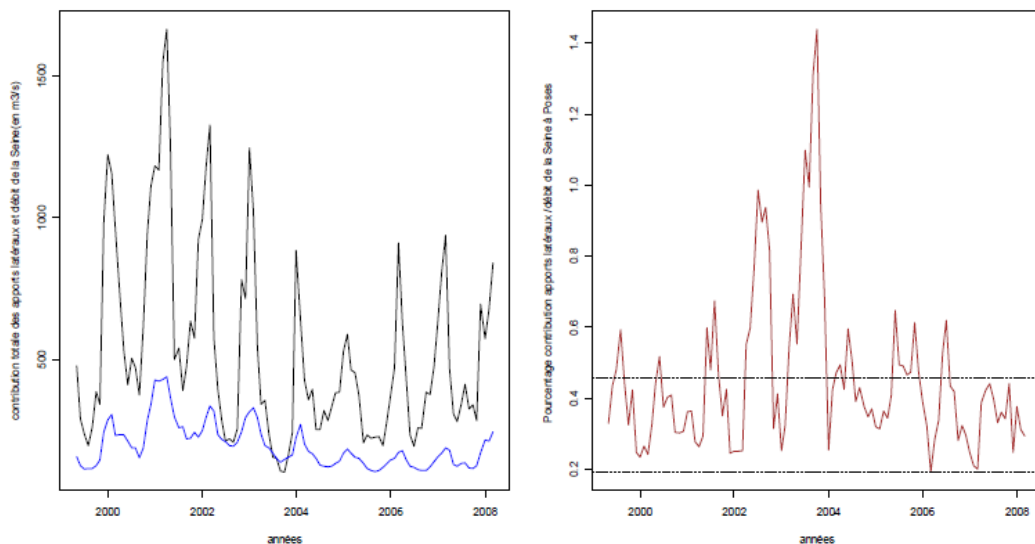
Objectif A

RAPPORT FINAL V2

### 4.1.6.3. BILAN A GRANDE ECHELLE

Ce chapitre est basé sur l'étude proposée par Massei N. et Fritier N., 2010, qui présente une synthèse complète sur les apports de la nappe au débit de la Seine. En synthèse, on retient les éléments suivants :

- Le soutien au débit de la Seine par la nappe de la Craie est loin d'être négligeable en période de basses eaux : 19% dans les périodes de contribution les plus basses, pouvant plus que doubler la valeur du débit de la Seine mesuré à Poses lors des périodes de sécheresse importante.
- La rive gauche (85 à 95% du total), et plus particulièrement le bassin hydrogéologique de l'Eure, s'avère être le principal contributeur de ces apports latéraux. A elle seule, sa contribution peut être équivalente à une part comprise entre le quart et la moitié des apports latéraux totaux (24 à 48% du total).
- 94 à 100% des écoulements des bassins hydrogéologiques de la rive droite s'écouleraient, en effet, par l'intermédiaire des rivières, tandis que les écoulements de surface en rive gauche n'auraient pas cette même importance (82,7% de la Risle et seulement 34,8% de l'Eure). Au final, il apparaît que les écoulements de surface et les écoulements souterrains sont équivalents pour l'ensemble des bassins hydrogéologiques latéraux à la Seine.



**Fig. 46. A (à gauche) : Evolution de l'importance du débit des apports latéraux totaux (ligne bleue continue) et du débit de la Seine mesuré à Poses (ligne noire continue) de 1999 à 2008 ; B (à droite) : Importance relative du débit des apports latéraux totaux par rapport au débit de la Seine mesuré à Poses de 1999 à 2008. En pointillés la valeur minimale et moyenne du rapport Apports latéraux/Seine, Massei et Fritier 2010**

La Fig. 46A (à gauche) met, d'après les auteurs, en évidence une concordance du débit mesuré à Poses et des apports latéraux totaux.

Les valeurs maximales sont atteintes lors des périodes hivernales, due à la crue de la Seine, tandis que les valeurs minimales sont atteintes lors des périodes estivales, due à l'étiage de la Seine.

L'importance relative du débit des apports latéraux totaux par rapport au débit de la Seine (Fig. 46B à droite) varie de 19 à 144%, avec une moyenne établie à 45% pour la période d'étude 1999-2008.

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

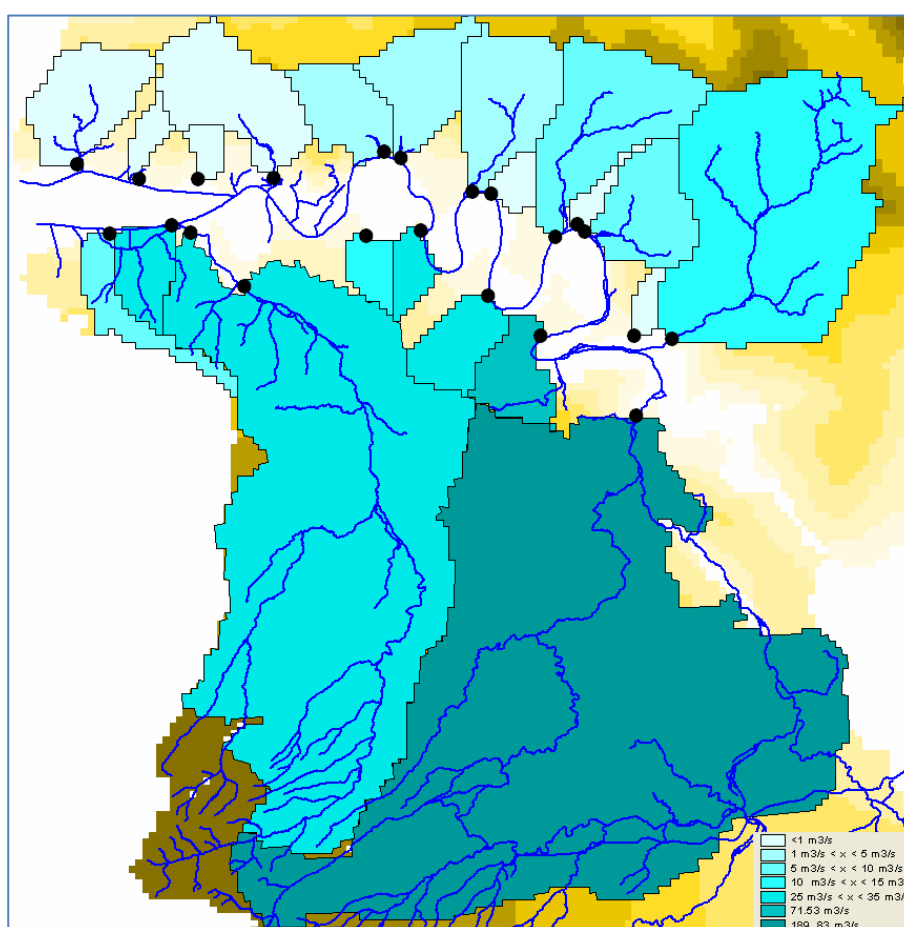
Objectif A

RAPPORT FINAL V2

Contrairement aux valeurs minimales qui sont peu affectées, les valeurs maximales de la contribution des apports latéraux par rapport au débit de la Seine mesuré à Poses augmentent dans les périodes de hauts niveaux piézométriques (2001-2003), des événements météorologiques extrêmes (telle que la canicule - été 2003) pouvant accroître encore cet effet.

La contribution des apports latéraux à l'estuaire varie entre 19 et 70% (moyenne : 36%) pendant les périodes de crues (hiver-printemps), tandis qu'elle varie entre 28 et 144% (moyenne : 56%) pendant les périodes d'étiage (été-automne).

D'autre part, l'étude des variations de ces différentes composantes met en évidence, quant à elle, que l'importance relative de la Risle et des autres bassins hydrogéologiques sont à leur maximum lors des périodes de crue et pendant leur période de décrue (2001-2005), tandis que l'importance relative de l'Eure est maximale lors des périodes de bas niveau piézométrique (1999-2001 ; 2005-2008). Ainsi, si l'Eure est le contributeur principal des apports latéraux, il ne l'est pas en période de crue.



**Fig. 47. Carte des apports hydrologiques en situation de haut niveau piézométrique**

En synthèse, nous pouvons conclure de l'analyse de ces auteurs que les apports de la nappe de la Craie resteraient modérés en période de crue :

- Les apports de la nappe du bassin de l'Eure contribuent au débit de crue de la Seine, pour nettement moins de 10% du débit de la Seine.
- Les apports de la nappe des autres bassins notamment de la Risle contribuent au débit de crue de la Seine pour environ 15% du débit de la Seine.



## 4.2. ANALYSES STATISTIQUES DES NIVEAUX

### 4.2.1. Principes d'analyse

Les paragraphes suivants présentent la synthèse des analyses des niveaux aux différents marégraphes et leurs relations avec les facteurs primaires.

La méthodologie globale repose sur les hypothèses suivantes.

Le niveau mesuré dénommé Z dépend des facteurs primaires :

- M, composante de la marée issue de l'analyse du signal des niveaux : le signal M s'obtient en premier lieu par une analyse harmonique, puis par une prédiction des niveaux de la marée à partir de ces composantes ;
- Pa, Pression Atmosphérique au Havre ;
- Q, Débit à Poses ;
- V, le Vent ; Va, Vd, amplitude et direction du vent au Cap de la Hève. L'amplitude est réduite à 10 m d'altitude (voir chapitre 4.1.5).

Ainsi, Z s'écrit :

$$Z = Z(M, P_a, Q, V).$$

Supposer que les facteurs primaires sont indépendants revient à écrire :

$$Z = Z_M + Z_{Pa} + Z_Q + Z_V + Res$$

Res est un résidu qui, comme nous le verrons par la suite, possède des propriétés importantes.

A noter que la fonction  $Z - Z_M$  est usuellement dénommée la Surcote (S) même si elle intègre l'influence de nombreux facteurs. Nous garderons cette notation par la suite pour clarifier la lecture du document.

Dans le cas où les facteurs primaires sont effectivement indépendants, la méthode d'analyse utilise la composition des opérateurs selon les étapes suivantes :

- 1) Détermination de la composante de marée par analyse harmonique  
 $S_M = Z - Z_M(Z)$
- 2) Détermination de la composante liée au débit à partir de la surcote  $S_M$   
 $S_Q = S_M - Z_Q(S_M)$
- 3) Détermination de la composante liée à la Pression atmosphérique  
 $S_{Pa} = S_Q - Z_{Pa}(S_Q)$
- 4) Détermination de la composante liée au Vent et du résidu  
 $Res = S_V = S_{Pa} - Z_V(S_V)$

Comme nous le verrons par la suite notamment dans les chapitres 4.2.5, 4.2.7 et 4.2.8 dédiés à Rouen, Heurteville et Elbeuf, la marée et le débit ne sont pas toujours indépendants. Il est alors nécessaire d'adapter la méthodologie d'analyse selon les étapes suivantes :

- 1) Détermination de la composante liée à la marée et débit par corrélation double  
 $S_{M,Q} = Z - Z_{M,Q}(Z)$
- 2) Détermination de la composante liée à la Pression atmosphérique  
 $S_{Pa} = S_{M,Q} - Z_{Pa}(S_{M,Q})$

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

### 3) Détermination de la composante liée au Vent et du résidu

$$Res = S_V = S_{Pa} - Z_V(S_V)$$

De même afin d'obtenir des résultats plus satisfaisants, la méthodologie sera aussi adaptée à Tancarville afin de séparer la surcote marine et la surcote estuarienne :

$$Z = Z_{M,Q} + Z_{maritime} + Z_v^{estuarien}$$

La surcote à Tancarville sera ainsi corrélée à la surcote à la Balise A (chapitre 4.2.6).

### 4.2.2. Analyse de l'influence du vent par modélisation

L'analyse de l'influence du vent est un des paramètres les plus difficiles à identifier du fait principalement de la qualité de la mesure du vent elle-même comme nous le verrons dans les chapitres suivants. Le vent agit de deux façons :

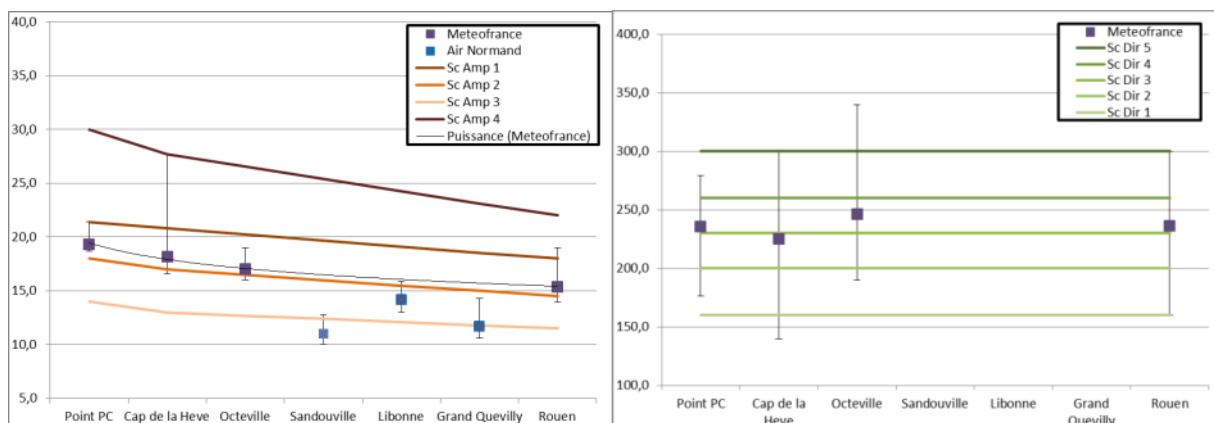
- Il provoque une surcote maritime indépendante de l'effet de pression atmosphérique, cette surcote s'étend dans l'estuaire par effet de remous ;
- Il provoque un gonflement propre de l'estuaire indépendant de la surcote précédente.

La modélisation peut alors s'avérer une force importante pour compléter les informations trop pauvres que l'on peut extraire des données. Dans ce but, nous avons utilisé une version restreinte au lit mineur du modèle numérique. Ce modèle permet d'apporter des éléments de réponse sur le deuxième point (gonflement) mais pas sur le premier. En effet, l'influence maritime du vent s'établissant à très grande échelle, elle nécessiterait des modélisations très complexes associées à des champs de vents tels qu'utilisés par Météo France pour pouvoir être déterminée.

Ce modèle est donc mis en œuvre pour étudier le gonflement de l'estuaire sous l'action du vent. Les cas étudiés sont issus de l'analyse des vents présentés au chapitre 4.1.5.3. Nous nous sommes concentrés sur les secteurs de vent dominant et induisant des surcotes importantes :

- Cap constant (secteur 180-300°N),
- Vent variable spatialement mais constant en temps, de moyens à exceptionnels.

Ces scénarios sont synthétisés par des profils en long cohérents avec les mesures présentées sur la Fig. 48.



**Fig. 48. Profils en long des scénarios représentatifs des variations de vent (amplitude à gauche, directions à droite)**

Les calculs suivants sont réalisés :

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

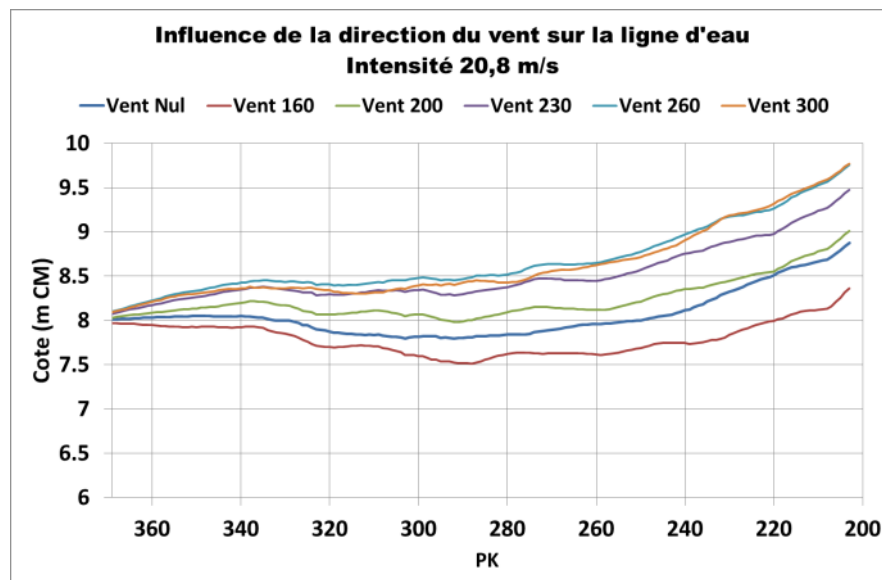
RAPPORT FINAL V2

- Cas de référence : débits de la seine = module, marée de coefficient 80, vent nul.
- 8 scénarios de vents (amplitude, direction) selon le schéma suivant :

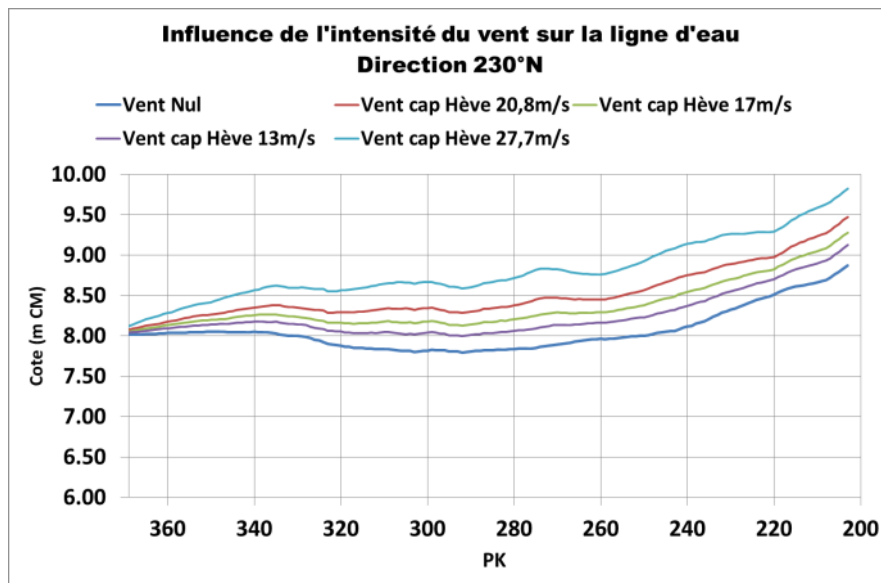
**Tabl. 27 - Scénarios de vents modélisés**

Vent au Havre		Amplitude du vent (m/s)				
		13	17	20,8	24	27.7
Direction du ven	160			X		
	200			X		
	230	X	X	X		X
	260			X		
	300			X		

Quelques résultats sont synthétisés sur la Fig. 49 et la Fig. 50 par représentation des lignes d'eau sur l'ensemble de l'estuaire de la Seine.



**Fig. 49. Influence de la direction du vent sur la ligne d'eau par modélisation**



**Fig. 50.** Influence de l'intensité du vent sur la ligne d'eau par modélisation

Nous notons que l'influence du vent est la plus forte à Rouen (Pk 240).

Les lignes d'eau complètes des surcotes le long de l'estuaire sont fournies en Annexe 2.

### 4.2.3. Elaboration de lois de comportement lié au vent par la modélisation

Au vu des résultats de la modélisation et de la difficulté d'établir une loi de comportement à partir des données de vent disponibles, il a été décidé d'utiliser la modélisation pour pallier cette limitation. Le modèle est ainsi utilisé pour établir les lois de comportement du niveau dans l'estuaire sous l'action du vent en fonction de son intensité et de sa direction. Nous nous sommes concentrés sur les secteurs de vent dominant et induisant des surcotes importantes (secteur 180-300°N). Les calculs suivants sont réalisés :

- Cas de référence : débits de la seine = module, marée de coefficient 80, **vent nul**.
- 21 scénarios de vents (amplitude, direction) selon le schéma suivant.

**Tabl. 28 - Scénarios de vents modélisés**

Vent au Havre		Amplitude du vent (m/s)				
		13	17	20,8	24	27.7
Direction du vent	180	X	X	X	X	
	200	X	X	X	X	
	230	X	X	X	X	X
	260	X	X	X	X	
	300	X	X	X	X	

Les données sont présentées sous forme de tableaux à Tancarville, Heurteauville, Rouen et Elbeuf (Tabl. 29 - ).

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

**Tabl. 29 - Surcotes (cm), liées aux vents, et calculées par la modélisation**

Tancarville (PK 340)						Heurteville (PK 297)							
SURCOTE (cm)		Amplitude Vent				SURCOTE (cm)		Amplitude Vent					
		13	17	20.7	24	27.7			13	17	20.7	24	27.7
Direction Vent	160			-8			Direction Vent	160			-21		
	180	1	2	-2	4			180	0	0	-2	-1	
	200	5	9	14	17			200	8	14	20	26	
	230	10	17	24	31	40		230	18	30	44	56	71
	260	12	19	29	37			260	23	38	56	72	
	300	9	16	23	30			300	21	34	50	64	

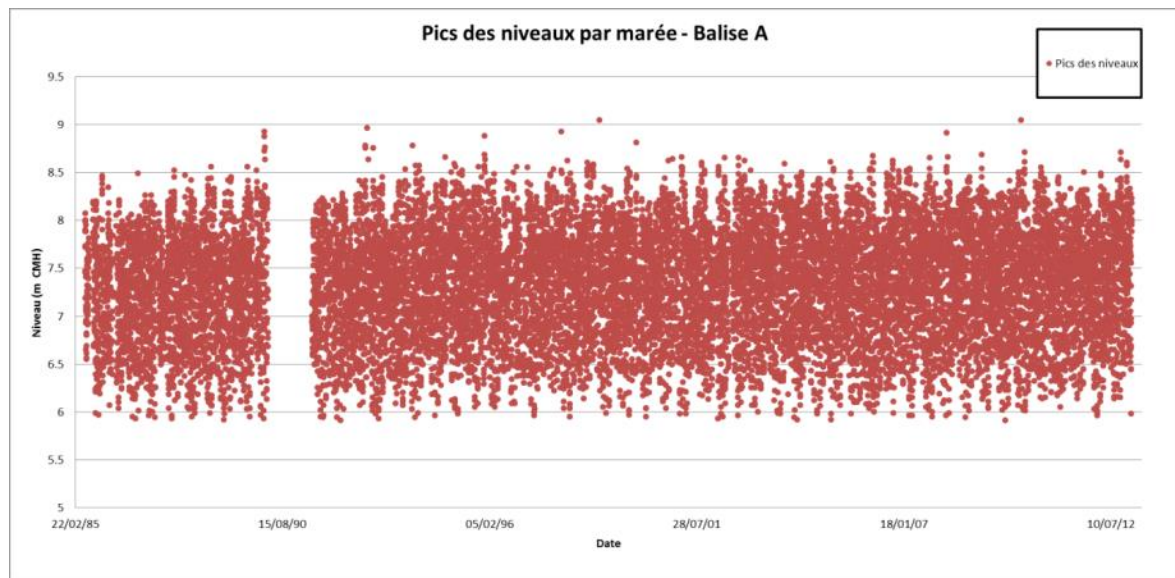
Rouen (PK 243)						Elbeuf (PK 219)							
SURCOTE (cm)		Amplitude Vent				SURCOTE (cm)		Amplitude Vent					
		13	17	20.7	24	27.7			13	17	20.7	24	27.7
Direction Vent	160			-27			Direction Vent	160			-48		
	180	-1	-1	-2	-4			180	-9	-16	-2	-31	
	200	10	16	24	30			200	1	2	3	4	
	230	23	38	58	72	91		230	16	27	40	52	67
	260	30	50	76	95			260	27	44	66	84	
	300	28	45	69	87			300	29	48	73	92	

Ces tableaux décrivent les lois de comportement en tout point de l'estuaire. Dans la suite de ce document, nous les utiliserons sur les stations de l'estuaire pour déterminer l'influence du vent par la méthode directe (issue des mesures) et les résultats de la modélisation. La comparaison de ces deux méthodes est synthétisée dans le chapitre 4.2.5.5.

#### 4.2.4. Marégraphe du Havre (Balise A)

Les données du marégraphe du Havre dénommé Balise A portent sur la période du 31 mai 1985 au 31 janvier 2013. Ces données, fournies par le GPMR, sont filtrées par les valeurs basses (inférieures au niveau moyen) ramenées au niveau moyen.

Pour chaque marée, les maximums des niveaux observés (pics) sont extraits et présentés sur la figure ci-après (Fig. 51). Les niveaux maximums varient de 5,91m à 9,04m CMH.



**Fig. 51. Pics des niveaux par marée à la Balise A – Le Havre**

L'analyse statistique des niveaux réalisée par le SHOM au Havre est reprise dans les Fig. 52 A et B qui montrent la loi de Gumbel pour les niveaux de pleine mer d'une part sur les enregistrements marégraphiques (A) et sur les enregistrements complétés par les données bibliographiques des événements extrêmes collectées (B).

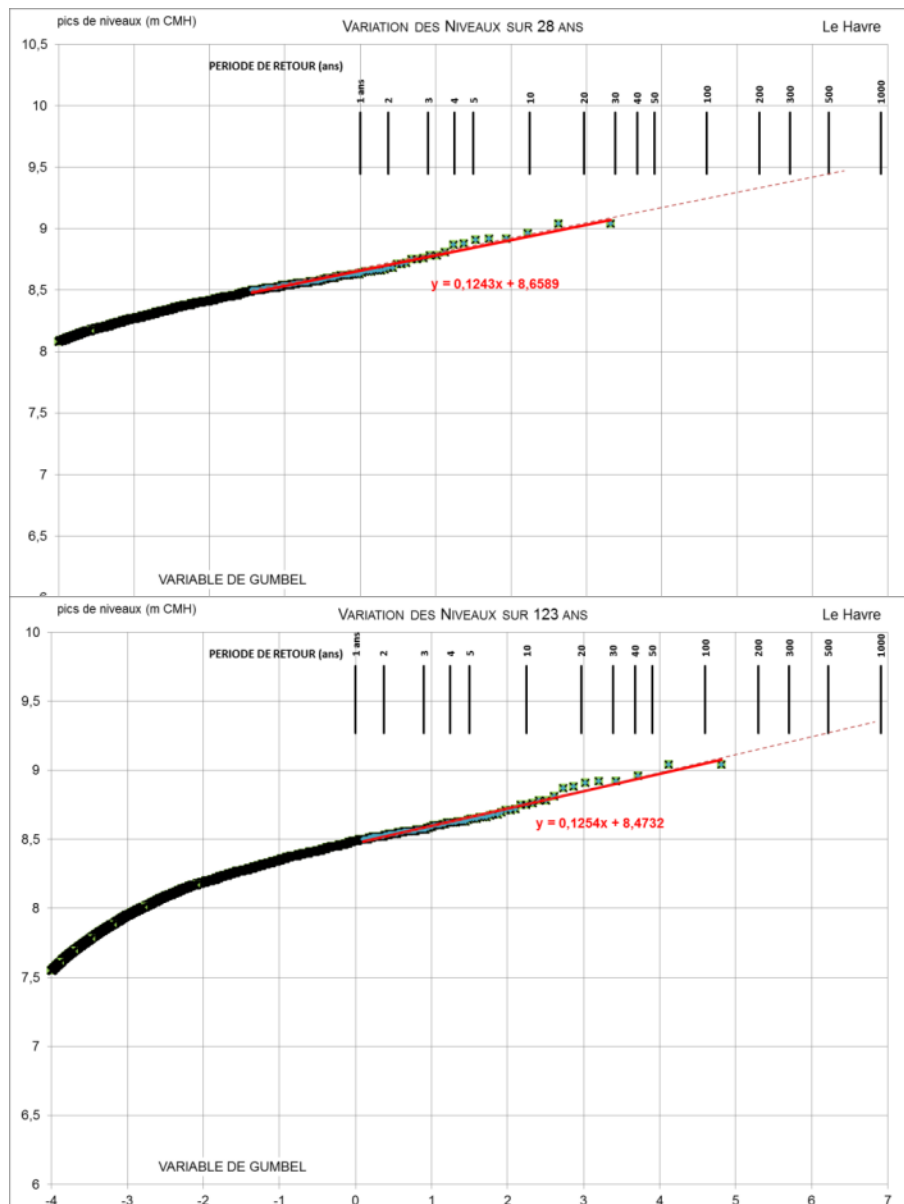
Nous notons l'accord entre la loi analysée sur les marégraphes (A) et celle fournie par le SHOM (0). Pour autant, intégrer les événements complémentaires relevés dans la bibliographie modifie sensiblement la loi de probabilité telle que la fréquence à 10 ans qui passe de 8,93 m à 8,75 m CMH.

Il convient de noter d'autre part que les 2 événements extrêmes de 1658 et 1740 ne peuvent être replacés sur cette courbe faute d'information sur cette station. Comme nous le verrons pour la station de Rouen, ces événements ont une position clef.

# Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2



**Fig. 52. Distribution probabiliste des niveaux au Havre. En haut (A) sur la base des données marégraphiques seules, en bas (B) en incorporant les événements extrêmes référencés dans la bibliographie**

#### 4.2.4.1. CONTRIBUTION DE LA MAREE

Ce jeu de données ne permet pas de déterminer les caractéristiques de la marée. Pour cela, le GPMR a fourni l'enregistrement complet des niveaux pour l'année 2010 sur lequel est pratiquée une analyse harmonique.

Les composantes harmoniques extraites sont présentées dans le tableau ci-après (Tabl. 30 -).

**Tabl. 30 - Composantes harmoniques de la marée à la Balise A**

Composante	Période (h)	Amplitude (cm)	Phase (°)
SA	8766,23	6,30	305,2
SSA	4382,91	3,84	24,7

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

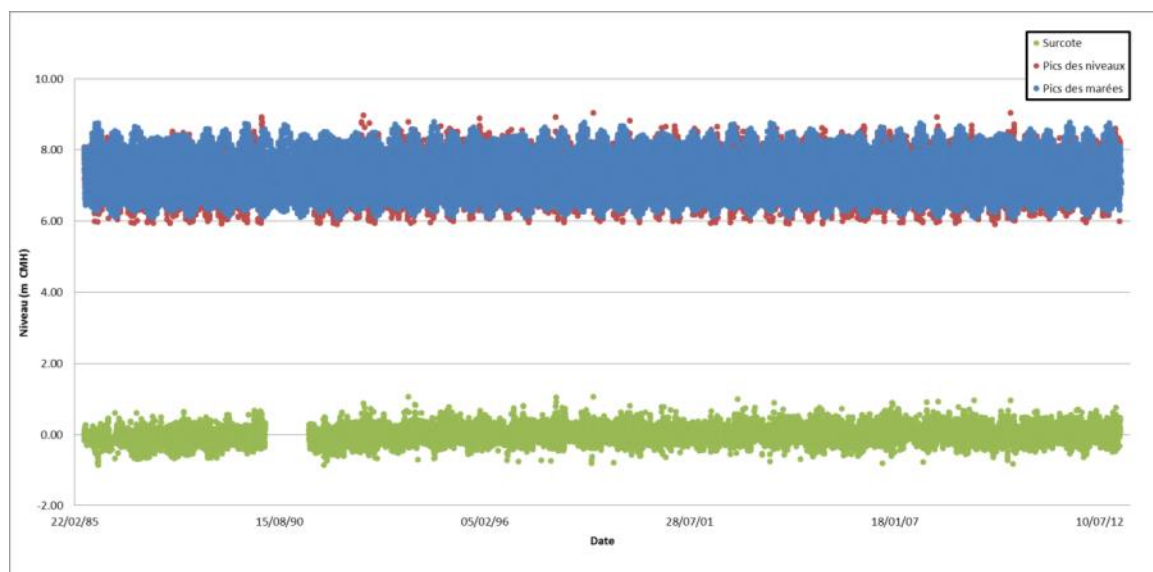
Objectif A

RAPPORT FINAL V2

Composante	Période (h)	Amplitude (cm)	Phase (°)
MSM	763,49	4,54	315,2
MM	661,31	3,04	352,6
MSF	354,37	5,39	30,1
MF	327,86	0,60	209,3
ALP1	29,07	0,38	131,8
2Q1	28,01	0,20	297,9
SIG1	27,85	0,54	40,1
Q1	26,87	1,34	2,5
RHO1	26,72	0,53	93,2
O1	25,82	5,18	31,7
TAU1	25,67	1,26	163,0
BET1	24,97	0,32	149,2
NO1	24,83	0,58	146,7
CHI1	24,71	0,48	4,8
PI1	24,13	0,65	79,2
P1	24,07	3,55	124,4
S1	24,00	1,27	328,9
K1	23,93	9,76	134,4
PS11	23,87	0,49	216,1
PHI1	23,80	0,64	24,6
THE1	23,21	0,25	109,6
J1	23,10	0,71	208,4
SO1	22,42	0,59	292,9
OO1	22,31	0,53	321,3
UPS1	21,58	0,21	326,1
OQ2	13,16	0,84	303,8
EPS2	13,13	1,81	355,2
2N2	12,91	6,68	289,1
MU2	12,87	8,13	355,2
N2	12,66	49,12	293,6
NU2	12,63	10,39	285,9
H1	12,44	2,14	337,7
M2	12,42	261,25	314,8
H2	12,40	0,77	62,2
MKS2	12,39	2,55	94,1
LDA2	12,22	6,74	317,7
L2	12,19	17,02	321,7
T2	12,02	4,86	348,9
S2	12,00	88,70	3,5
R2	11,98	0,46	257,9
K2	11,97	24,93	1,6
MSN2	11,79	3,62	188,0
ETA2	11,75	0,42	69,2
MO3	8,39	1,56	298,6
M3	8,28	1,37	330,4
SO3	8,19	0,84	36,7
MK3	8,18	0,92	87,0
SK3	7,99	0,41	109,0
MN4	6,27	9,13	108,1
M4	6,21	25,81	137,3
SN4	6,16	2,43	198,8
MS4	6,10	17,51	190,7
MK4	6,09	4,86	188,9
S4	6,00	1,91	266,1
SK4	5,99	0,99	257,4
2MK5	4,93	0,82	180,6
2SK5	4,80	0,15	73,0
2MN6	4,17	9,41	352,4
M6	4,14	16,56	20,7
2MS6	4,09	16,46	65,2
2MK6	4,09	4,23	61,9
2SM6	4,05	4,00	116,0
MSK6	4,04	2,69	113,9
M8	3,11	2,42	236,9

Ces composantes permettent d'effectuer une prédiction de la marée sur la période disponible des données 1985-2013. Le signal des niveaux de la marée  $Z_M$  est donc extrait du pic des niveaux  $Z$  (Fig. 53) et le résidu dénommé surcote est calculé :  $S_M = Z - Z_M(Z)$ .





**Fig. 53. Balise A – Le Havre : par marée, pics des niveaux, pic du signal de marée et surcote (Niveaux en CMH)**

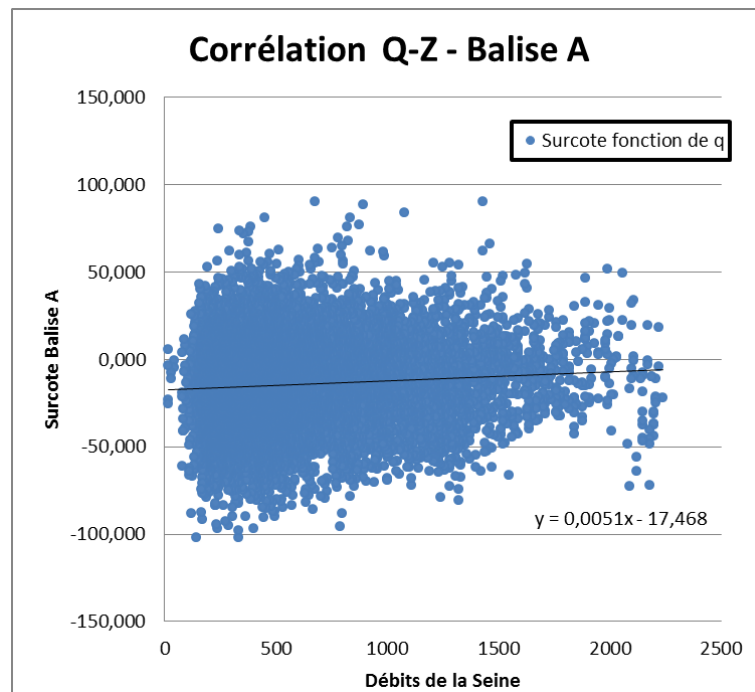
L'écart moyen des pics de marée est de 46,6 cm tandis que l'écart moyen de la surcote est de 17,6 cm.

#### 4.2.4.2. CONTRIBUTION DU DEBIT DE LA SEINE

A partir du signal de surcote, une corrélation avec le débit de la Seine est réalisée en tenant compte du temps de propagations de la Seine. Le coefficient de corrélation maximale Surcote-Débit de la Seine en tenant compte d'un décalage temporel dû à la propagation de la seine jusqu'à 7 jours est de 0,11 donc non significatif.

La relation Surcote-Débit de la Seine est présentée graphiquement en format Q-Z sur la Fig. 54. Le coefficient de régression linéaire est de 0,0051, valeur quasi nulle, montrant l'absence de relation significative entre le débit de la Seine et la surcote à la Balise A.

La surcote à la Balise A est donc indépendante du débit de la Seine et donc encore davantage des apports de la nappe.

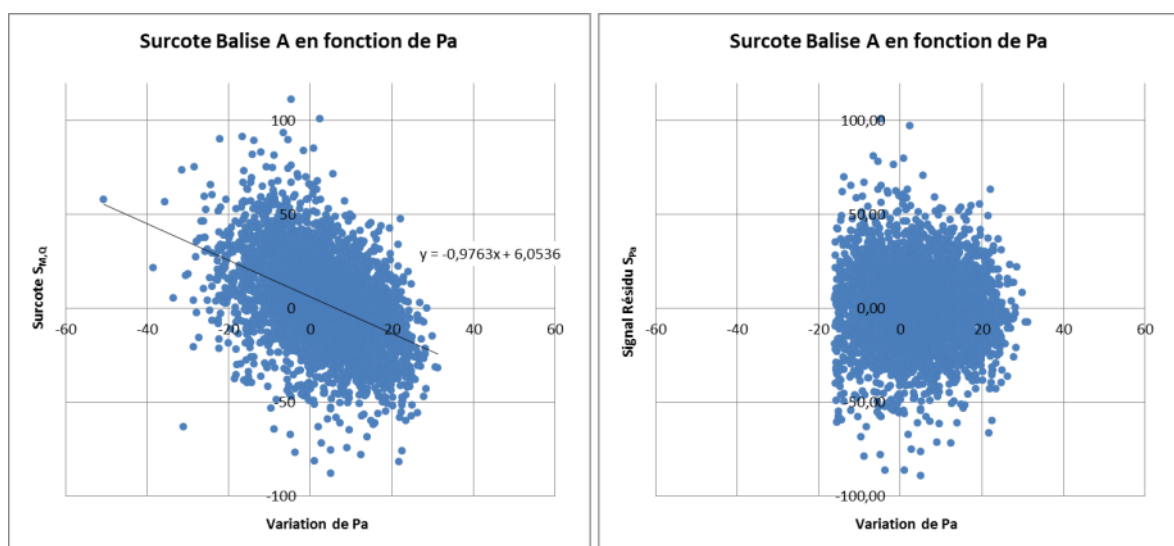


**Fig. 54. Balise A – Le Havre : graphique Q-Z des corrélations Surcote et Débit de la Seine**

#### 4.2.4.3. CONTRIBUTION DE LA PRESSION ATMOSPHERIQUE

La pression atmosphérique joue un rôle dans le niveau de la mer par basculement du plan d'eau à très grande échelle. A partir du signal de surcote issu de la marée, une corrélation avec la variation de pression atmosphérique au Havre est réalisée. La variation de la pression atmosphérique est obtenue en retranchant à la pression atmosphérique la valeur moyenne de la pression. Le coefficient de corrélation Surcote-Pression atmosphérique est de 0,44 donc suffisamment significatif.

La relation Surcote-Pression atmosphérique est présentée graphiquement en format  $S_M / \delta Pa$  sur la Fig. 55. Le coefficient de régression linéaire est de -0,987. L'influence de la pression atmosphérique sur les niveaux peut donc s'apparenter à une fonction linéaire.



**Fig. 55. Balise A – Le Havre : graphique S- $\delta Pa$  des corrélations Surcote et Pression atmosphérique (à gauche  $S_M$ , à droite  $S_Pa$ )**

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

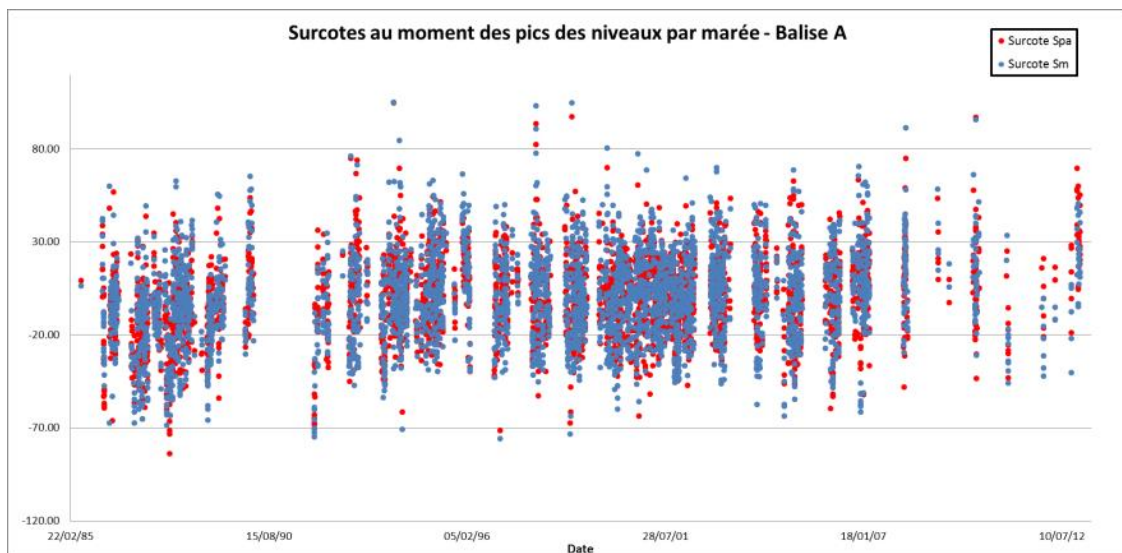
Nous retranchons à la surcote le signal issu de la pression atmosphérique selon la relation linéaire établie :  $S_{Pa} = S_M - Z_{Pa}(S_M)$ . La Fig. 56 et le tableau ci-après (Tabl. 31 - ) présentent les fonctions  $S_{Pa}$  et  $S_M$  et les caractéristiques statistiques des deux signaux.

**Tabl. 31 - Balise A - Analyse des signaux  $S_{Pa}$  et  $S_M$**

	$S_M$	$S_{Pa}$
Ecart moyen	18,8	16,7
Ecart type	23,9	21,6
Coefficient de corrélation avec Pa	-0,446	0,002

Le tableau montre que le signal de surcote filtré de la pression atmosphérique est bien indépendant de la pression atmosphérique ( $\text{corr}(S_{Pa}, \delta Pa) \approx 0$ ).

La Fig. 55, à droite, présente la relation entre le signal filtré et la pression atmosphérique. Si la décorrélation est montrée par l'alignement avec l'axe des X, la dispersion reste très importante notamment quand la variation de la pression atmosphérique est presque nulle.

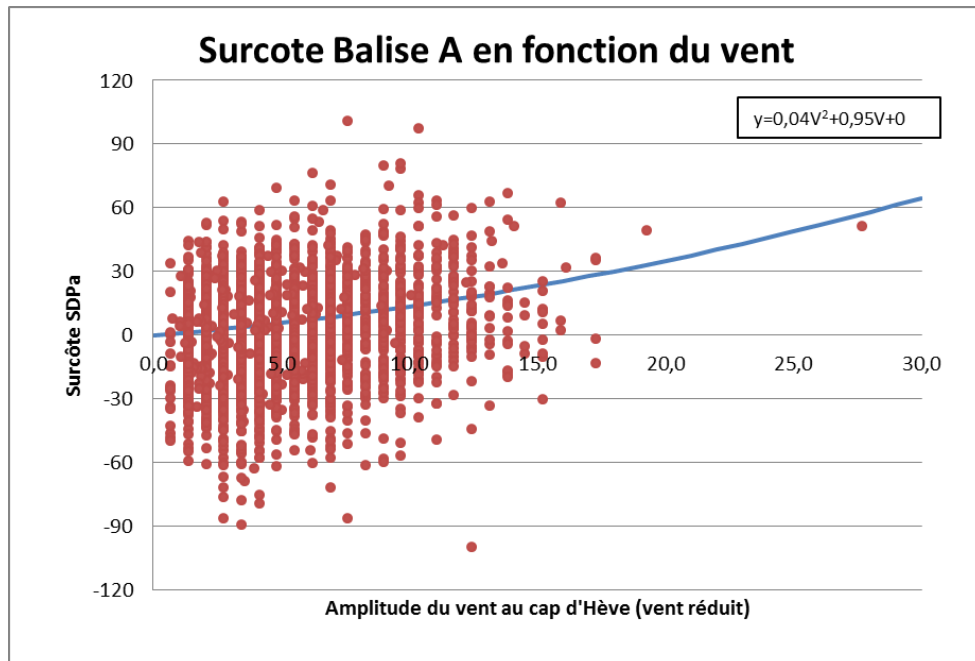


**Fig. 56. Balise A – Le Havre : comparaison des surcotes SM et des surcotes retranchées du signal de la Pression Atmosphérique SPA**

#### 4.2.4.4. CONTRIBUTION DU VENT

Le vent a une influence sur le niveau de la mer par entrainement des masses d'eau à grande ou moyenne échelle.

A partir du signal de surcote issu du filtrage de la pression atmosphérique  $S_{Pa}$ , une corrélation avec l'intensité du vent au Cap de la Hève (vent réduit à 10m) est réalisée. Le coefficient de corrélation Surcote  $S_{Pa}$  / Vent est de 0,2 donc faiblement significatif.



**Fig. 57. Balise A – Le Havre : graphique S-V des corrélations Surcote SPa et Amplitude du vent réduit à 10 m au Cap de la Hève**

La relation Surcote-Amplitude du Vent est présentée graphiquement en format S-V sur la figure ci-dessus (Fig. 57). Une régression bilinéaire fournit une approximation raisonnable des surcotes grâce notamment aux valeurs extrêmes de vent. Une analyse sectorielle n'apporte pas plus d'information car les vents dominants qui conditionnent fortement la courbe de tendance sont tous issus du même secteur 220-260°N.

Nous retranchons à la surcote le signal issu du vent selon la relation quadratique établie  $S_V = S_{Pa} - Z_V(S_{Pa})$ . Le Tabl. 32 - présente les caractéristiques statistiques des deux signaux  $S_{Pa}$  et  $S_V$ .

**Tabl. 32 - Balise A - Analyse statistique des signaux  $S_{Pa}$  et  $S_V$**

	$S_{Pa}$	$S_V$
Ecart moyen	16,7	16,5
Ecart type	21,6	21,3
Coefficient de corrélation avec le Vent	0,20	-0,006

Ce tableau montre que le signal de surcote filtré du vent est bien indépendante du vent ( $\text{corr}(S_V, V)=0,0$ ).

#### 4.2.4.5. CONTRIBUTION DU VENT – DONNEES DETAILLEES SUR 2010

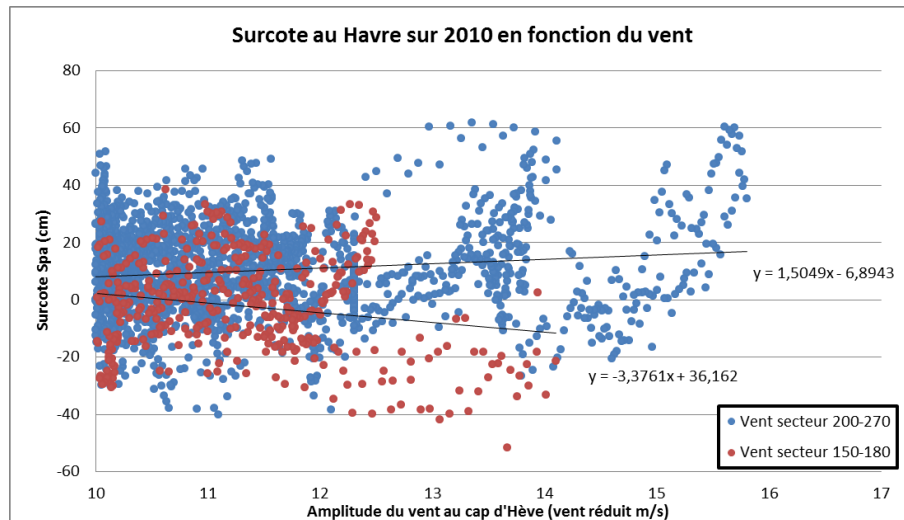
Afin d'identifier plus précisément le rôle du vent, une analyse identique est menée sur les données plus complètes de 2010 avec le vent à Quevilly.

L'ensemble des traitements sur le signal complet (pas seulement le pic, cela permet de disposer de beaucoup plus d'événements) est réalisé sur les données du marégraphe du Havre sur 2010. Le coefficient de corrélation Surcote  $S_{Pa}$ -Vent est là encore faiblement significatif.

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2



**Fig. 58. Balise A : graphique S-V des corrélations Surcote SPa et Amplitude du vent réduit à 10 m à Quevilly**

Pour autant, la relation Surcote-Amplitude du Vent est présentée graphiquement en format S-V sur la Fig. 58 selon deux jeux de données restreint en fonction de la direction du vent : un secteur SW-W et un secteur SE. La différence des deux droites de régression est nettement identifiable. Cela peut se traduire de la manière suivante :

- La surcote induite par les vents est identifiable à partir des vents d'amplitude 11 à 12 m/s ;
- Les vents de secteur SW-W produisent des surcotes positives ;
- Les vents de secteur SE produisent des surcotes négatives.

Si les tendances sont clairement identifiables, l'incertitude pour définir précisément la relation entre la surcote au Havre et le vent reste importante. A noter que l'extrapolation de la courbe de tendance sur les données de 2010 pour le vent extrême mesuré à 27m/s fournit une surcote de 31 cm contre 54 cm mesurée ce qui prouve que la loi n'est pas adéquate pour autant et ne peut être établie sur la base de vents inférieurs à 16m/s seuls.

#### 4.2.4.6. ANALYSE DU RESIDU

A partir du signal de surcote issue du filtrage du vent  $S_v$ , on obtient le résidu final. Ce résidu présente les caractéristiques suivantes (Tabl. 33 -).

**Tabl. 33 - Balise A – Statistiques du signal résidu**

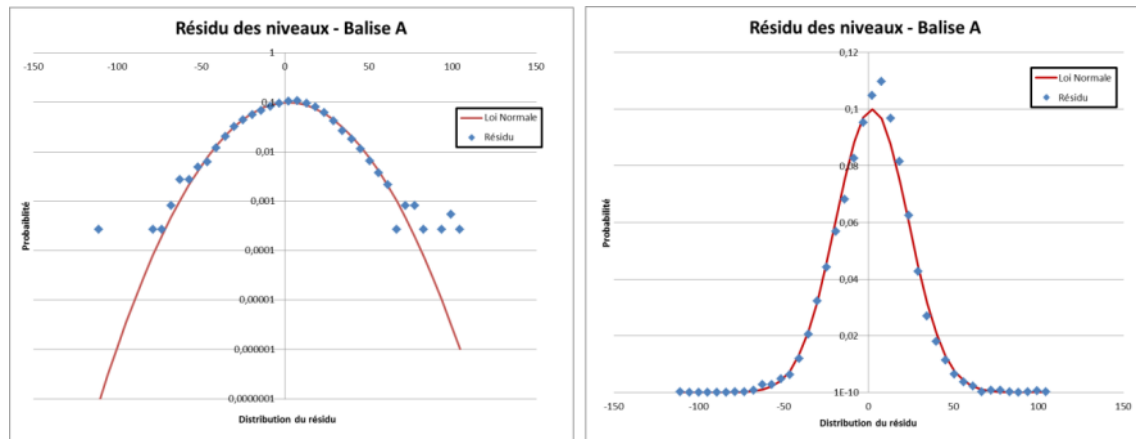
	Résidu (cm) $S_v$
Moyenne	-0,42
Ecart moyen	16,71
Ecart type	21,37

Ce résidu présente une caractéristique spécifique : il suit sensiblement une loi normale (Fig. 59).

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2



**Fig. 59. Balise A – Le Havre : Distribution du résidu et loi Normale**

Cette distribution permettra d'établir une loi de probabilité de sa distribution.

Quel est l'origine de ce résidu ? Plusieurs origines peuvent être évoquées :

- Des imprécisions sur les mesures des facteurs primaires (fréquence d'acquisition, période couverte, imprécision de la mesure même) ;
- Présence d'autres facteurs primaires tels que la houle (peu probable) ;
- L'évolution de la morphologie du lit de la Seine.
- La réalisation d'aménagements modifiant la propagation de certains facteurs primaires.

En ce qui concerne cette dernière possibilité, il est à noter que le signal de marée ne montre pas de différence notable entre les époques de mesures. A titre d'exemple, le coefficient de corrélation entre les niveaux de marée (prédit à partir des mesures de 2010) et la surcote  $S_M$  est de 0,01 sur l'ensemble de la période de 1985 à 2013. Sur la période de 1985 à 1988 le coefficient de corrélation entre les niveaux de marée et la surcote  $S_M$  est de 0,005, ce qui prouve que les niveaux de la marée n'ont pas été sensiblement modifiés durant ces époques.

#### 4.2.4.7. CONCLUSION

L'analyse des mesures de niveaux à partir des connaissances des facteurs primaires disponibles a permis d'établir les lois de comportement des niveaux au Havre :

$$Z = Z_M + Z_{Pa} + Z_Q + Z_V + \text{Res}$$

Avec

$Z_M$  fourni par une analyse harmonique du signal de marée.

$Z_Q = 0$

$Z_{Pa} = -0,9763 \delta Pa + 6,054$

$Z_V = 0,04 Va^2 + 0,95Va + 0$

D'autre part, le résidu Res présente un écart moyen de 16 cm et suit une loi normale permettant de définir sa probabilité.

Cependant, l'utilisation de ces formules ne permet pas de prendre compte les phénomènes se produisant à l'échelle du secteur « Manche - Baie de Seine » ; c'est pourquoi dans la suite de l'étude les résultats de l'étude SHOM seront utilisés pour obtenir les surcotes ainsi que leurs périodes de retour au Havre

---

#### 4.2.5. Marégraphe de Rouen

Les données du marégraphe de Rouen portent sur la période du 10 mai 1985 au 6 février 2013. Ces données, fournies par le GPMR, sont filtrées par les valeurs basses (inférieures au niveau moyen) ramenées au niveau moyen.

Il n'est pas possible de réaliser une analyse harmonique. En effet, l'influence des débits est telle qu'ils rendent la relation niveau-marée non univoque. Ceci peut se traduire par le fait que la marée ne se propage pas dans l'estuaire de la même façon à faible débit qu'à fort débit.

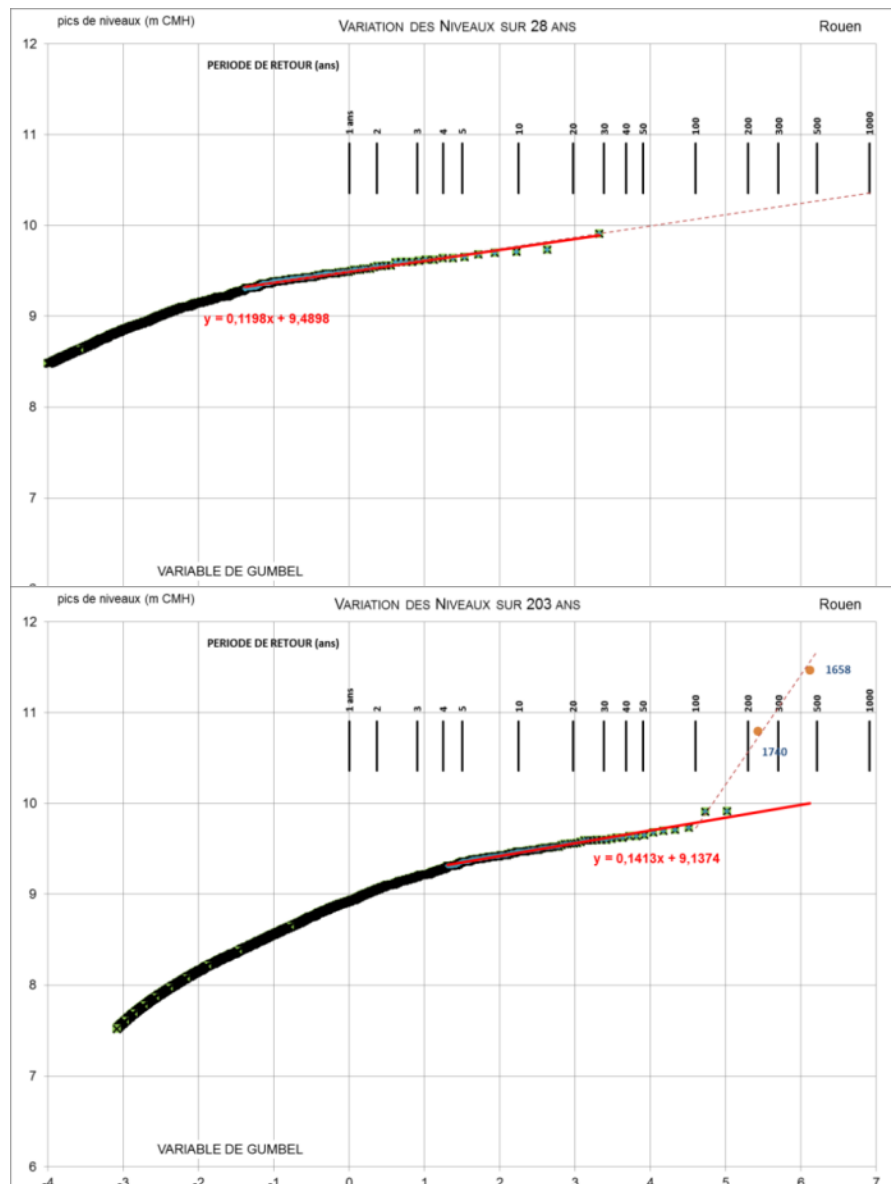
##### 4.2.5.1. ANALYSE STATISTIQUE DIRECTE DES NIVEAUX

L'analyse statistique des niveaux peut être effectuée comme l'a fait le SHOM au Havre sur Rouen. Les Fig. 60A et B montrent la loi de Gumbel pour les niveaux de pleine mer d'une part sur les enregistrements marégraphiques (A) et sur les enregistrements complétés par les données bibliographiques des événements extrêmes collectés (B). Nous notons une bonne concordance des lois proposées. Pour autant, les 2 événements extrêmes de 1658 et 1740 ne peuvent pas être replacés sur cette courbe. Soit la crédibilité de ces valeurs peut être remise en cause, soit les valeurs extrêmes liées à des événements de tempêtes suivent une loi comportementale différente mais le nombre limité d'événements ne permet pas de conclure.

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2



**Fig. 60. Distribution probabiliste des niveaux à Rouen. En haut (A) sur la base des données marégraphiques seules, en bas (B) en incorporant les événements extrêmes référencés dans la bibliographie**

### 4.2.5.2. CONTRIBUTION DE LA MAREE ET DES DEBITS DE LA SEINE

La fonction corrélative double  $Z_{M,Q}(Z)$  est établie par valeur moyenne par tronçon. Cette fonction est établie en fonction du débit journalier de la Seine à Poses et des niveaux de la même marée au Havre (Balise A) fournie par une prédiction (0).

Le tableau ci-après montre d'une part que les pics de niveau augmentent avec le débit de la Seine et avec la cote de la pleine mer au Havre. Cette relation décrit la loi de comportement  $Z_{M,Q}(Z)$ .

Afin d'estimer l'importance de la relation débit-marée, on calcule l'écart moyen et l'écart type pour une marée donnée à la Balise A de l'ensemble des niveaux observés à Rouen quel que soit le débit, puis on calcule la moyenne de ces écarts moyens et écarts types pour l'ensemble des marées. Ceci revient à effectuer ces calculs ligne par ligne dans le tableau Tabl. 34 - , puis de moyenniser sur la



## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

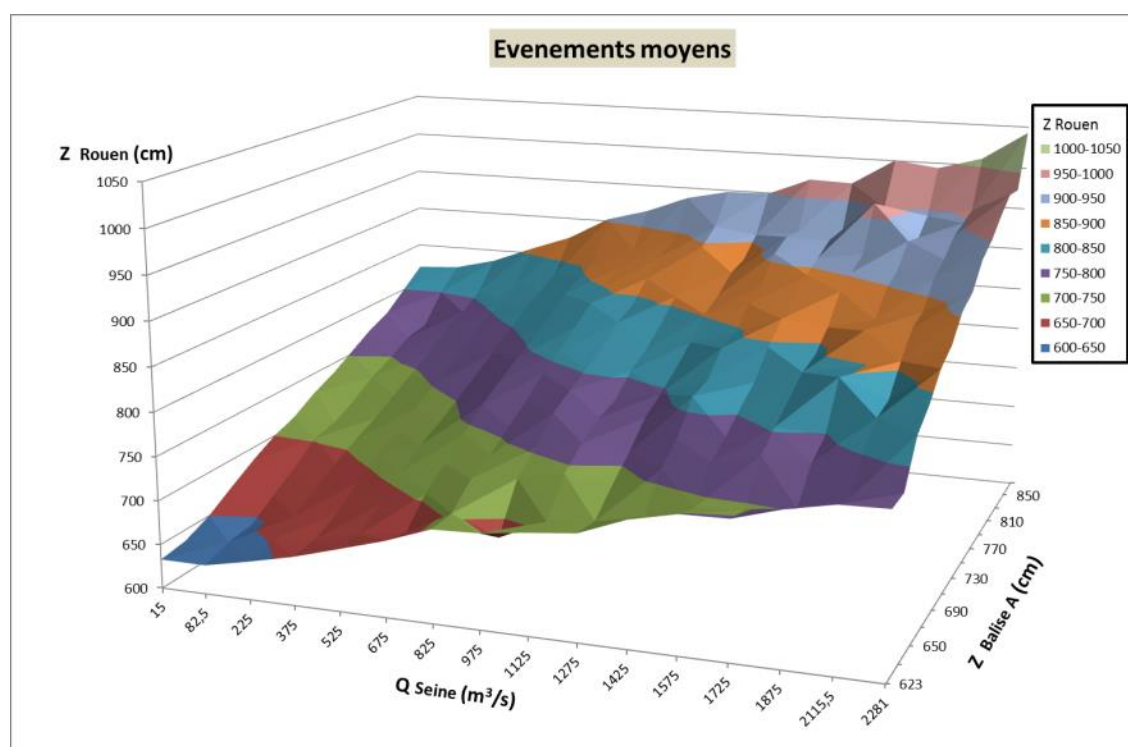
Objectif A

RAPPORT FINAL V2

colonne résultante. Si la propagation de la marée est indépendante du débit, ces valeurs devraient être proches de zéro. On obtient respectivement 44,1 et 54,1 cm. Ceci montre que l'influence des débits est très importante et ne peut pas être décorrélée de la marée. A titre d'exemple, à la balise A, ces valeurs sont respectivement de 4,9 et 6,6 cm.

**Tabl. 34 - Rouen – Valeur moyenne des niveaux en fonction des gammes de débits et des niveaux de la marée au Havre**

Q (m <sup>3</sup> /s)	15-150	150-300	300-450	450-600	600-750	750-900	900-1050	1050-1200	1200-1350	1350-1500	1500-1650	1650-1800	1800-1950	1950-2281
Z(cm)														
623-640	640	651	658	670	676	680	690	708	715	726	741	745	752	770
640-660	645	661	672	689	706	728	734	745	738	761	773	787	785	803
660-680	664	676	691	708	723	739	753	764	759	779	786	803	799	823
680-700	681	692	708	725	744	757	778	778	783	812	804	819	848	828
700-720	702	706	722	737	764	772	791	784	797	817	819	835	847	857
720-740	708	718	737	751	779	792	803	805	812	841	846	842	874	882
740-760	721	732	751	766	793	807	814	817	830	846	867	861	874	888
760-780	738	747	763	782	805	824	833	835	852	868	880	891	898	915
780-800	749	761	779	797	820	840	843	857	862	881	896	902	908	926
800-820	763	778	794	814	837	850	864	873	880	907	906	913	933	942
820-840	768	790	808	825	847	865	881	898	885	917	917	925	938	948
840-894	800	805	820	836	857	875	893	913	906	914	930	951	944	955



**Fig. 61. Vue tridimensionnelle de la surface décrite par le Tabl. 34 -**

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

Les tableaux Tabl. 35 - et Tabl. 36 - présentent respectivement l'écart moyen et l'écart type par cellule du tableau (Tabl. 34 -) des observations autour de la loi de comportement  $Z_{M,Q}(Z)$ .

**Tabl. 35 - Rouen – Valeur moyenne de  $S_{M,Q}$  des niveaux par rapport à  $S_{M,Q}$**

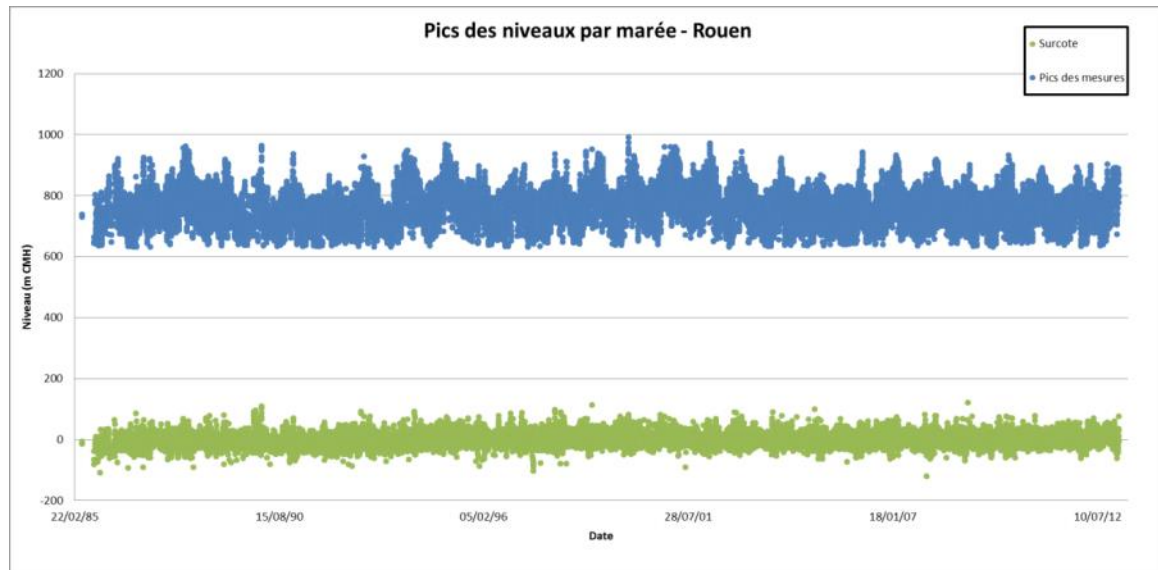
Q (m3/s)	15-150	150-300	300-450	450-600	600-750	750-900	900-1050	1050-1200	1200-1350	1350-1500	1500-1650	1650-1800	1800-1950	1950-2281
Z(cm)														
623-640		-3,5	-2,3	-1,6	-6,6	1,1	-10,8	-3,4	-4,5	-1,8	-7,7	-7,7	-9,2	
640-660	-7,8	-1,7	-2,2	0,8	-0,4	3,5	-0,1	4,9	-4,7	-0,4	3,4	1,4	-0,3	2,7
660-680	-5,3	-0,9	0,2	1,3	0,8	-1,0	-0,5	0,9	-5,1	2,8	-0,1	4,5	0,3	1,7
680-700	-5,7	-0,5	0,4	1,4	1,4	-0,2	3,3	-0,7	-0,1	7,3	-3,6	-0,2	7,4	-6,1
700-720	0,3	-1,2	0,3	-0,1	3,2	-1,2	2,2	-3,8	0,1	-0,5	-3,4	2,0	-5,5	1,2
720-740	-3,1	-1,8	0,0	0,6	2,6	0,7	2,0	1,1	-0,4	5,7	2,5	-5,7	5,4	5,1
740-760	-4,8	-1,8	1,1	0,0	2,4	0,3	1,2	-1,1	-1,1	0,8	4,2	-4,6	-2,8	-1,0
760-780	-3,2	-1,5	-0,2	1,0	1,5	1,3	2,2	-1,6	0,9	2,2	-0,1	0,7	0,2	4,0
780-800	-4,6	-1,2	-0,1	0,1	2,0	4,0	-2,7	2,5	-2,2	0,7	1,8	2,8	-2,9	-4,0
800-820	-3,8	0,7	0,2	2,4	2,6	0,9	2,0	-0,5	-0,3	7,3	-0,9	-1,6	1,8	-7,8
820-840	-8,2	0,3	0,6	2,0	1,9	2,6	1,4	3,8	-5,0	5,4	0,8	6,4	-5,9	-10,8
840-894	1,9	0,4	0,0	1,0	-1,0	-1,1	1,3	4,0	-1,7	1,5	-4,3	3,9	0,8	0,2

**Tabl. 36 - Rouen – Ecart type des niveaux par rapport à  $S_{M,Q}$**

Q (m3/s)	15-150	150-300	300-450	450-600	600-750	750-900	900-1050	1050-1200	1200-1350	1350-1500	1500-1650	1650-1800	1800-1950	1950-2281
Z(cm)														
623-640		12,6	22,1	23,8	18,4	30,2	27,0	15,6	19,2	1,8	13,0	18,1	10,3	
640-660	13,3	18,2	20,6	22,7	24,7	23,7	21,6	21,1	26,4	27,9	22,6	15,9	3,3	13,6
660-680	15,0	19,0	21,4	21,0	21,4	27,7	20,5	23,9	19,9	21,4	26,0	8,8	20,0	28,0
680-700	16,4	19,8	20,7	21,3	23,8	23,6	24,5	22,1	19,0	19,5	12,6	16,2	19,1	25,3
700-720	16,6	21,4	22,5	23,1	22,0	24,7	22,2	21,2	30,0	26,0	28,4	15,6	20,0	26,7
720-740	14,6	21,7	22,6	20,6	22,3	26,7	25,8	24,6	30,1	24,0	19,0	16,6	18,9	20,3
740-760	23,4	19,8	23,9	21,3	22,4	26,2	21,8	32,9	20,5	33,2	18,4	23,2	23,0	33,7
760-780	28,9	20,7	21,0	20,7	23,7	23,0	25,1	21,4	26,2	25,5	26,7	11,1	22,5	20,0
780-800	28,1	20,4	23,1	23,3	22,2	23,5	24,2	21,9	21,6	26,1	25,2	10,6	13,1	19,1
800-820	24,3	22,3	23,0	22,9	28,8	22,1	26,5	23,0	23,8	26,4	30,6	30,4	8,5	16,6
820-840	33,6	21,0	23,9	23,0	28,8	23,2	28,1	27,3	27,0	23,4	23,7	6,4	15,6	15,8
840-894	25,3	20,4	21,2	24,5	32,8	17,7	23,6	19,0	13,9	16,8	23,3	7,9	10,8	6,0

Nous pouvons ainsi déterminer la surcote à Rouen par une interpolation bilinéaire du  $S_{M,Q} = Z - Z_{M,Q}(Z)$ .

La Fig. 62 présente les pics des niveaux observés à Rouen et la surcote obtenue  $S_{M,Q}$ .



**Fig. 62. Rouen : par marée, pics des niveaux et surcote**

A noter que le résidu présente un écart moyen et un écart type semblables à ceux observés sur le Havre (Tabl. 37 -).

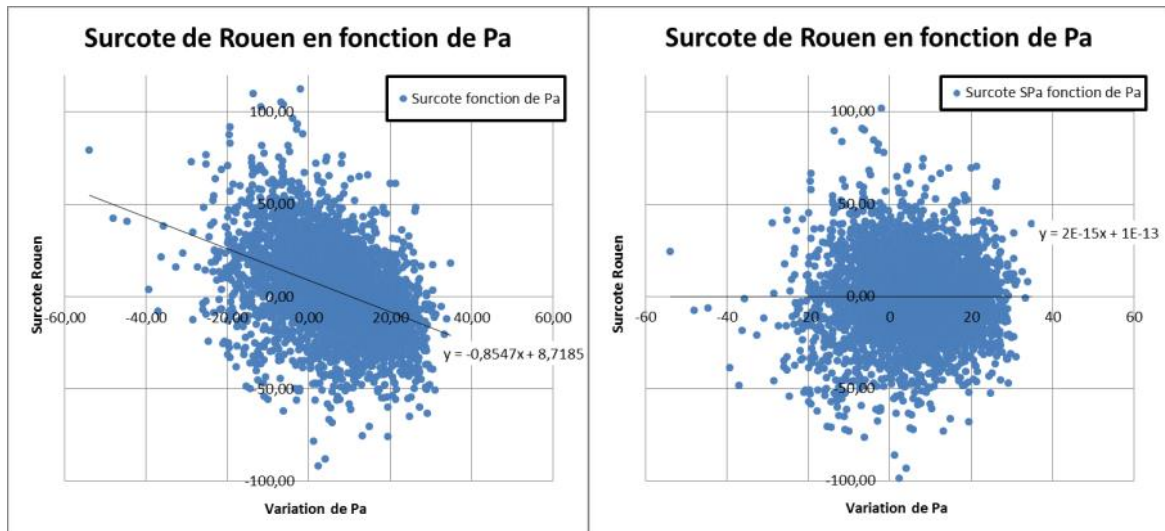
**Tabl. 37 - Rouen – Statistiques de  $S_{M,Q}$**

	1985-2013
Ecart moyen de $S_{M,Q}$ (cm)	17,3
Ecart type de $S_{M,Q}$ (cm)	22,2

#### 4.2.5.3. CONTRIBUTION DE LA PRESSION ATMOSPHERIQUE

A partir du signal de surcote issu de la marée et du débit de la Seine, une corrélation avec la variation de pression atmosphérique au Havre est réalisée. La variation de la pression atmosphérique est obtenue en retranchant à la pression atmosphérique la valeur moyenne de la pression. Le coefficient de corrélation Surcote-Pression atmosphérique est de 0,40 donc relativement significatif.

La relation Surcote-Pression atmosphérique est présentée graphiquement en format  $S_{M,Q}-\delta Pa$  sur la Fig. 63. Le coefficient de régression linéaire est de -0,855. L'influence de la pression atmosphérique sur les niveaux peut donc s'apparenter à une fonction linéaire.



**Fig. 63. Rouen : graphique  $S_{M,Q}/\delta Pa$  (à gauche) et  $S_{Pa}/\delta Pa$  (à droite) des corrélations Surcote et Pression atmosphérique à Rouen**

Nous retranchons à la surcote le signal issu de la pression atmosphérique selon la relation linéaire établie  $S_{Pa} = S_{M,Q} - Z_{Pa}(S_{M,Q})$ . Le Tabl. 38 - présente les caractéristiques statistiques des deux signaux  $S_{Pa}$  et  $S_{M,Q}$ .

**Tabl. 38 - Rouen - Analyse statistique des signaux  $S_{Pa}$  et  $S_{M,Q}$**

	$S_{M,Q}$	$S_{Pa}$
Ecart moyen	18,1	16,4
Ecart type	23,4	21,4
Coefficient de corrélation avec Pa	-0,40	1,0E-015

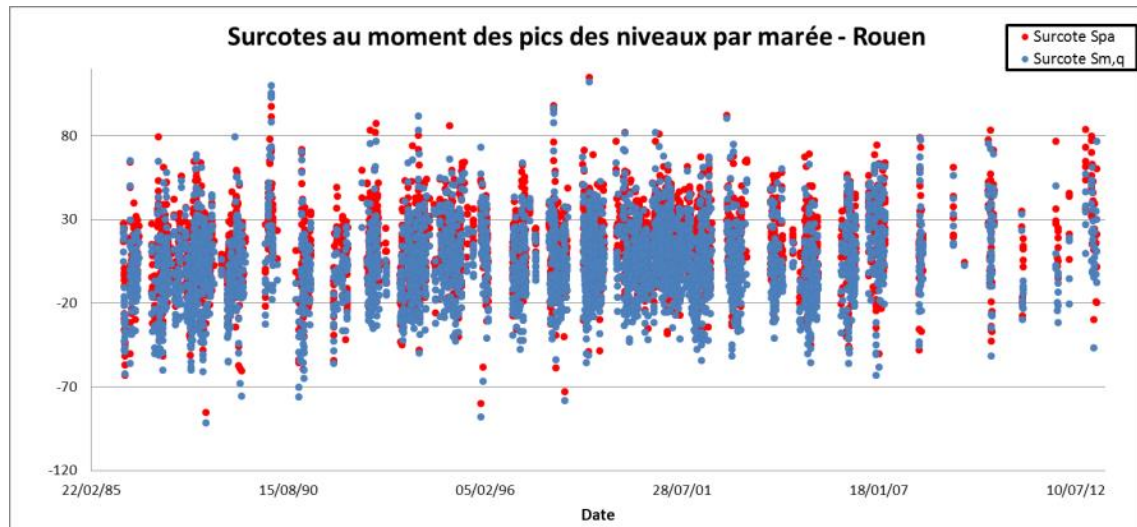
Le tableau ci-dessus montre que le signal de surcote filtré de la pression atmosphérique est bien indépendant de la pression atmosphérique ( $\text{corr}(S_{Pa}, \delta Pa) = 0$ ).

La Fig. 64 présente les deux signaux  $S_{Pa}$  et  $S_{M,Q}$ .

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

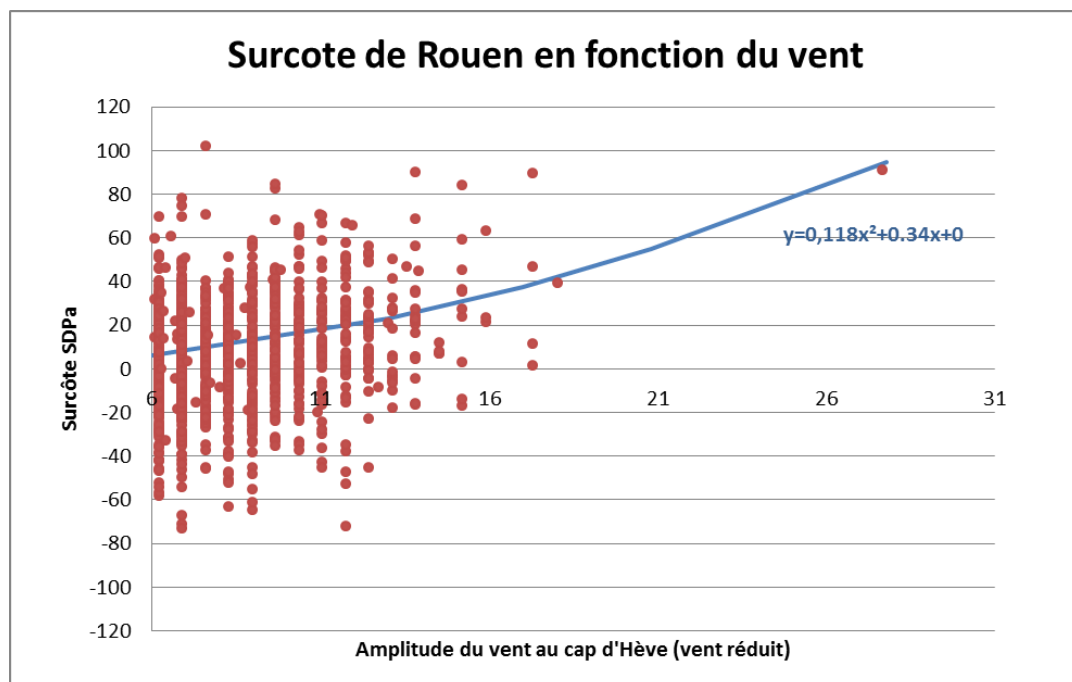


**Fig. 64. Rouen : comparaison des surcotes  $S_{M,Q}$  et des Surcotes retranchées du signal de la Pression Atmosphérique  $S_{Pa}$**

#### 4.2.5.4. CONTRIBUTION DU VENT – MESURES

Le vent joue un rôle a priori incertain en milieu estuarien. Il a souvent été négligé à tort comme il a été montré dans l'estuaire de la Gironde (RIG, 2012).

A partir du signal de surcote issue du filtrage de la pression atmosphérique  $S_{Pa}$ , une corrélation avec l'intensité du vent au Cap de la Hève (vent réduit à 10m) est réalisée. Le coefficient de corrélation Surcote  $S_{Pa}$  / Vent est de 0,27 donc un peu significatif et même légèrement supérieur à celui mesuré au Havre (0,2).



**Fig. 65. Rouen : graphique S-V des corrélations Surcote  $S_{Pa}$  et Amplitude du vent réduit à 10 m au Cap de la Hève**

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

La relation Surcote-Amplitude du Vent est présentée graphiquement au format S-V sur la Fig. 65. Une loi de régression quadratique paraît mieux convenir qu'une régression linéaire car elle permet de capturer l'événement exceptionnel du 27 février 1990 (27,7 m/s au Havre).

Comme nous le verrons dans le chapitre 4.2.2, la modélisation confirme cette loi de comportement.

Nous retranchons à la surcote le signal issu du vent selon la relation quadratique établie  $S_V = S_{Pa} - Z_V(S_{Pa})$ . Le Tabl. 39 - présente les caractéristiques statistiques des deux signaux  $S_{Pa}$  et  $S_V$ .

**Tabl. 39 - Rouen - Analyse statistique des signaux  $S_{Pa}$  et  $S_V$**

	$S_{Pa}$	$S_V$
Ecart moyen	16,4	15.9
Ecart type	21,4	20.6
Coefficient de corrélation avec le Vent	0,27	0,02

Ce tableau montre que le signal de surcote filtré de la pression atmosphérique est suffisamment indépendant de la pression atmosphérique ( $\text{corr}(S_V, V)=0,02$ ). Sa valeur, non nulle, prouve qu'il reste une certaine relation certainement liée aux autres secteurs de vents mais il n'a pas été possible d'établir une loi de comportement sur ceux-ci faute d'événements significatifs mesurés.

### 4.2.5.5. CONTRIBUTION DU VENT – MODELE NUMERIQUE

La modélisation numérique est utilisée pour déterminer les effets du vent sur le gonflement de la ligne d'eau dans l'estuaire. Les données sont présentées sous forme de tableaux à Rouen. Les lignes d'eau complètes des surcotes le long de l'estuaire sont fournies en Annexe 2.

**Tabl. 40 - Rouen – Surcote liée au gonflement de l'estuaire par le vent déterminé par modélisation**

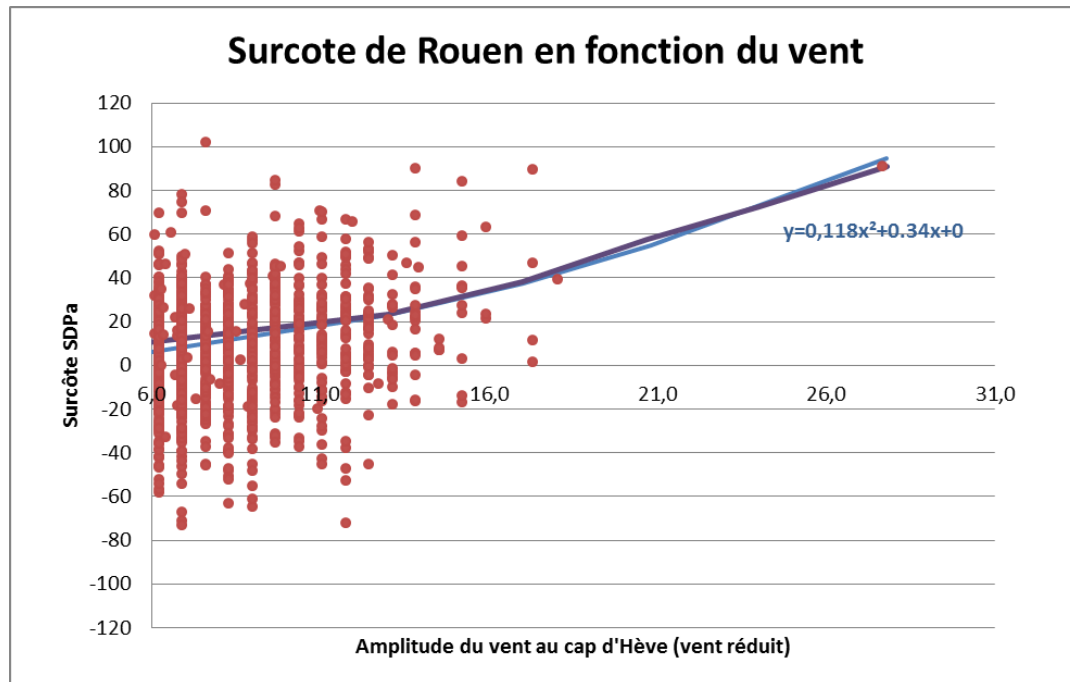
	Rouen	Amplitude Vent				
	Pk=243	13	17	20,7	24	27,7
Direction Vent	160			-27		
	180	-1	-1	-2	-4	
	200	10	16	24	30	
	230	23	38	58	72	91
	260	30	50	76	95	
	300	28	45	69	87	

Ce tableau décrit la loi de comportement à Rouen lié à l'action du vent sur l'estuaire en fonction de l'intensité du vent et de sa direction. Il est donc possible de comparer ces résultats avec ceux issus de l'analyse des données. Pour cela nous reportons sur le graphe de la Fig. 65 la relation obtenue par modélisation dans le cas d'un vent dominant (Cap 230°N).

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2



**Fig. 66.** Rouen : graphique S/V des corrélations Surcote  $S_{Pa}$  et Amplitude du vent réduit à 10 m au Cap de la Hève – comparaison des courbes de tendance (bleu) et des résultats de la modélisation pour le cap dominant (violet)

L'écart entre les deux courbes est quasi nul, montrant de manière croisée à la fois le bon comportement de la modélisation et l'approche méthodologique pour déterminer l'influence du vent.

Le calcul du résidu  $S_v$  sur Rouen à partir de ces nouvelles lois de comportement fournit le résultat présenté dans le tableau suivant.

**Tabl. 41 - Comparaison des résidus  $S_v$  obtenue par analyse des données et par modélisation sur Rouen**

	Max.	Min.	Moy.	Ecart moyen	Ecart Type	Corrélation / Vent
SV initial par données	92,8	-98,8	-5,6	15,9	20,6	0,024
SV par modélisation	93,3	-98,5	-5,4	15,7	20,3	0,023

On observe un léger gain (réduction du résidu).

#### 4.2.5.6. ANALYSE DU RESIDU

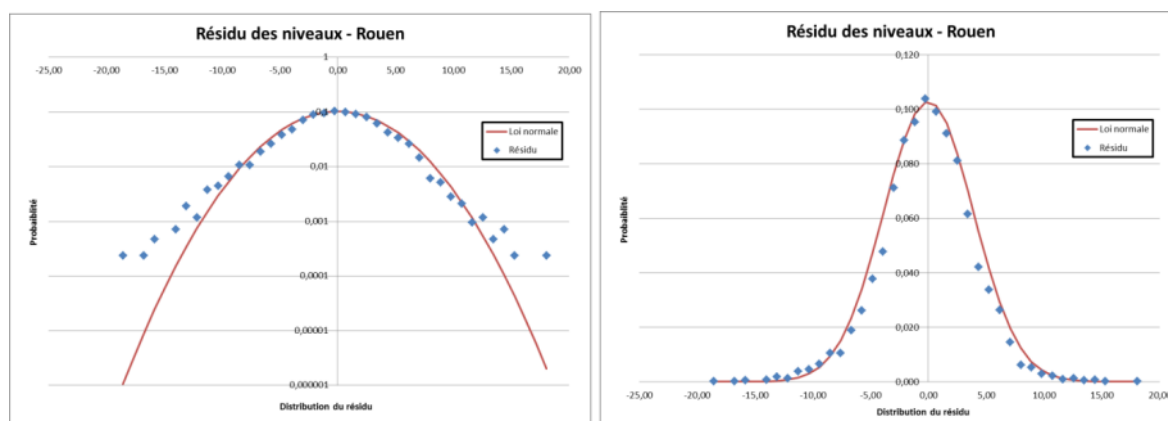
Le signal de surcote issue du filtrage du vent  $S_v$  par les données est dénommé le résidu final. Ce résidu possède les caractéristiques décrites au Tabl. 39 - .

Ce résidu présente une particularité : il suit sensiblement une loi normale (Fig. 67).

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2



**Fig. 67. Rouen : Distribution du résidu et loi Normale**

Cette loi de comportement permet d'établir une loi de probabilité de sa distribution.

Quel est l'origine de ce résidu ? Plusieurs origines peuvent être évoquées :

- Des imprécisions sur les mesures des facteurs primaires (fréquence d'acquisition, période couverte, imprécision de la mesure même) ;
- D'autres facteurs primaires peuvent exister mais leurs apports seront faibles et ne peuvent expliquer les événements extrêmes ;
- La réalisation d'aménagements modifiant la propagation de certains facteurs primaires ;
- L'évolution de la morphologie du lit de la Seine.

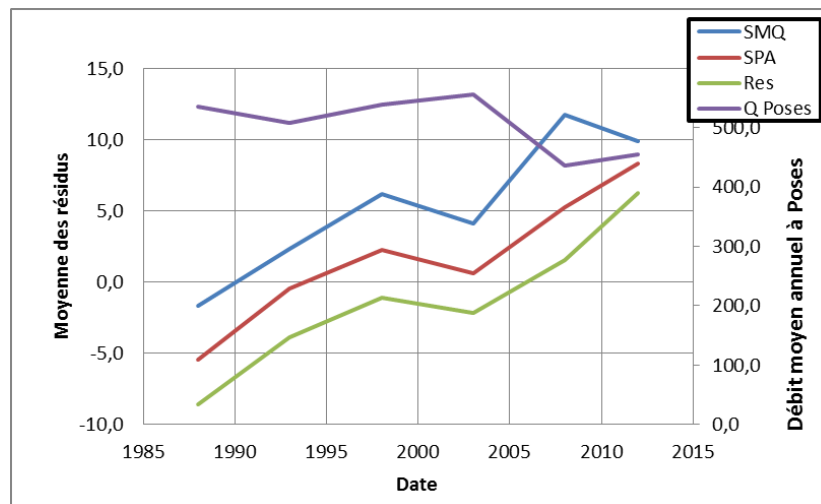
Une approche consiste à vérifier si le signal de surcote  $S_{M,Q}$  présente des caractéristiques variables selon l'époque considérée. Pour cela nous effectuons une moyenne mobile sur un cycle de 5 ans de manière à être suffisamment représentatif. Les résultats sont présentés sur le Tabl. 42 - et la Fig. 68.

**Tabl. 42 - Rouen – Statistiques de  $S_{M,Q}$  par période temporelle**

Période	Moyenne $S_{M,Q}$ (cm)	Moyenne $S_{Pa}$ (cm)	Moyenne $S_V$ (ou Résidu, cm)	Moyenne de la variation de la pression Atmosphérique	Moyenne de l'amplitude du Vent
1986-2013	3,6	0,0	-3,2	5,9	4,7
1986-1990	-1,7	-5,4	-8,6	5,2	4,7
1991-1995	2,4	-0,4	-3,8	5,8	4,7
1996-2000	6,2	2,3	-1,1	6,9	4,8
2001-2005	4,1	0,6	-2,1	2,9	4,9
2006-2010	11,7	5,2	1,5	6,6	4,3
2010-2013	9,9	8,3	6,2	2,6	5,1

Le fait que les évolutions de ces statistiques soient sensiblement différentes du comportement statistique moyen sur la période complète démontre une inhomogénéité des trois signaux contrairement à celui déterminé au Havre.





**Fig. 68. Rouen : Evolution temporelle des 3 résidus :  $S_{M,Q}=Z-Z_{M,Q}$  ;  $S_{Pa}=Z_{M,Q}-Z_{Pa}$  ;  $Res=Z_{Pa}-Z_V$  et débit moyen annuel de la seine (violet)**

Cette figure montre que le comportement statistique des trois surcotes présentent une tendance homogène à l'accroissement au cours du temps. L'explication la plus plausible pour ce phénomène est l'engraissement général du lit de la Seine mais pour autant il est difficile de le démontrer.

#### 4.2.5.7. CONCLUSION

L'analyse des mesures de niveaux à partir des connaissances des facteurs primaires disponibles ont permis d'établir les lois de comportement des niveaux à Rouen :

$$Z = Z_{M,Q} + Z_{Pa} + Z_V + Res$$

Avec :

$Z_{M,Q}$  fourni par une analyse des valeurs moyennes par tronçon

$$Z_{Pa} = -0,8547 \delta Pa + 8,71854$$

$$Z_V = 0,118 V_a^2 + 0,34 V_a + 0 \text{ ou issu de la modélisation décrite par le tableau Tabl. 40 -}$$

D'autre part, le résidu Res présente un écart moyen de 16 cm et suit une loi normale permettant de définir sa probabilité.

#### 4.2.6. Marégraphe de Tancarville

Les données du marégraphe de Tancarville portent sur la période du 8 janvier 1988 au 6 février 2013. Ces données, fournies par le GPMR, sont filtrées par les valeurs basses (inférieures au niveau moyen) ramenées au niveau moyen.

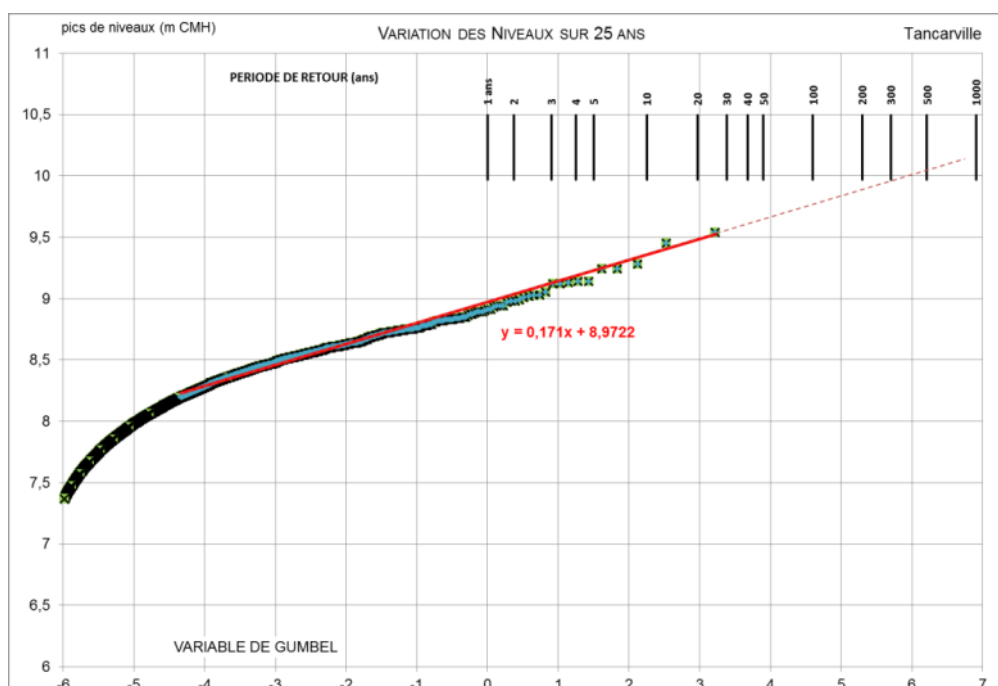
##### 4.2.6.1. ANALYSE STATISTIQUE DIRECTE DES NIVEAUX

L'analyse statistique des niveaux peut être effectuée comme l'ont fait le SHOM au Havre sur Tancarville. La Fig. 69 montre la loi de Gumbel pour les niveaux de pleine mer sur les enregistrements marégraphiques.

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2



**Fig. 69. Distribution probabiliste des niveaux à Tancarville sur la base des données marégraphiques**

### 4.2.6.2. CONTRIBUTION DE LA MAREE ET DES DEBITS DE LA SEINE

La fonction corrélative double  $Z_{M,Q}(Z)$  est établie par valeur moyenne par tronçon. Cette fonction est établie en fonction du débit journalier de la Seine à Poses et des niveaux de la même marée au Havre (Balise A) fournie par une prédiction (Tabl. 30 - ).

Le Tabl. 48 - montre un comportement semblable à celui de Rouen : les pics de niveau augmentent avec le débit de la Seine et avec la cote de la pleine mer au Havre. Cette relation décrit la loi de comportement  $Z_{M,Q}(Z)$ .

**Tabl. 43 - Tancarville - Valeur moyenne des niveaux en fonction des gammes de débits et des niveaux de la marée au Havre**

Q (m3/s)	15-150	150-300	300-450	450-600	600-750	750-900	900-1050	1050-1200	1200-1350	1350-1500	1500-1700	1700-2280
Z(cm)												
624-640	653,4	654,2	653,5	654,3	657,3	665,3	665,7	662,7	654,0	671,4	674,4	680,0
640-660	669,8	678,2	681,0	682,2	680,4	682,4	698,4	690,8	680,1	689,3	694,6	700,8
660-680	690,7	698,3	700,0	702,0	707,1	705,0	713,6	704,2	700,3	713,8	706,5	718,6
680-700	722,8	717,6	721,3	716,0	726,2	716,7	732,0	717,4	726,4	730,0	734,0	733,0
700-720	736,9	734,0	738,7	737,0	738,4	743,6	749,7	732,0	739,5	759,8	749,5	763,3
720-740	754,2	753,6	756,9	753,9	761,5	765,3	758,6	749,0	755,4	751,9	775,8	763,3
740-760	776,2	768,8	773,5	772,5	778,2	782,7	781,5	771,3	782,3	790,8	793,8	800,1
760-780	780,3	784,5	788,6	787,9	791,0	796,6	787,6	794,1	791,6	804,0	812,0	803,3
780-800	797,5	801,6	805,4	809,8	817,5	805,3	809,9	806,8	811,0	824,4	817,1	824,7
800-820	809,7	814,0	826,5	821,9	825,3	830,0	833,1	838,4	830,1	841,1	831,3	844,3

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

Q (m3/s)	15-150	150-300	300-450	450-600	600-750	750-900	900-1050	1050-1200	1200-1350	1350-1500	1500-1700	1700-2280
Z(cm)												
820-840	830,3	833,4	837,5	841,8	834,7	839,1	845,6	856,6	836,2	841,7	841,0	858,9
840-892	808,4	807,2	810,5	813,0	808,9	822,4	834,5	850,7	836,1	838,2	810,0	883,5

L'écart moyen des observations autour de la loi de comportement  $Z_{M,Q}(Z)$  est faible : 2,8 cm.

Nous pouvons observer que les résultats sont assez homogènes par ligne sauf pour les valeurs les plus importantes de débits. Ceci signifie que l'influence des débits sur les niveaux des marées à Tancarville est faible et ne se fait sentir qu'à partir de débits autour de 1000 à 1200 m<sup>3</sup>/s. Pour autant une analyse harmonique directe du signal aurait introduit un biais pour les débits les plus importants, là où la surcote est la plus importante.

Nous pouvons ainsi déterminer la surcote à Tancarville par une interpolation bilinéaire du Tabl. 31 -  $S_{M,Q} = Z - Z_{M,Q}(Z)$ .

Là encore, le résidu présente un écart moyen et un écart type semblables à ceux observés sur le Havre (Tabl. 44 -).

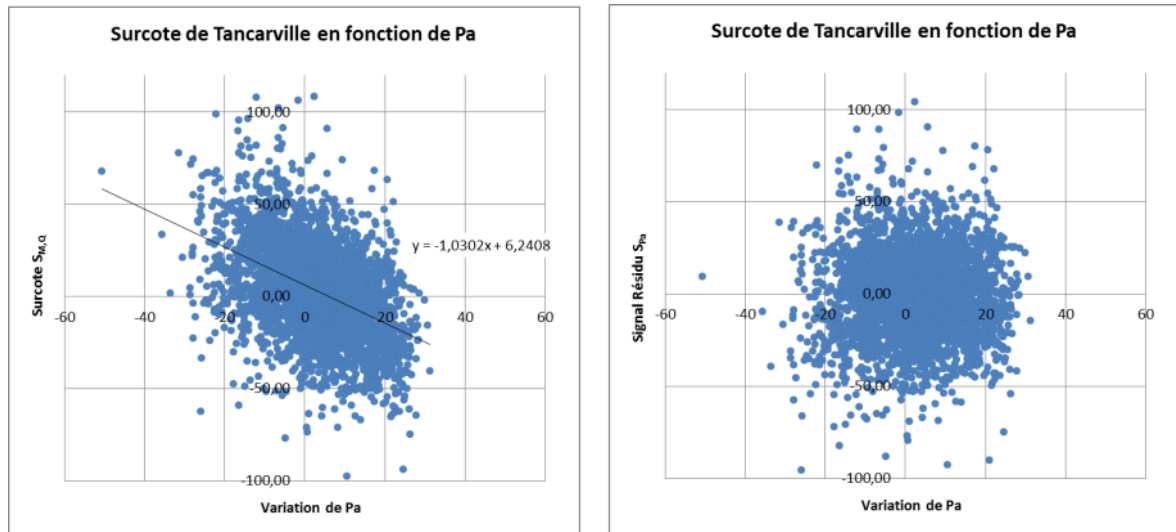
**Tabl. 44 - Tancarville – Statistiques de  $S_{M,Q}$**

	1985-2013
Ecart moyen de $S_{M,Q}$ (cm)	19.6
Ecart type de $S_{M,Q}$ (cm)	25.2

### 4.2.6.3. CONTRIBUTION DE LA PRESSION ATMOSPHERIQUE

A partir du signal de surcote issu de la marée et du débit de la Seine, une corrélation avec la variation de pression atmosphérique au Havre est réalisée. La variation de la pression atmosphérique est obtenue en retranchant à la pression atmosphérique la valeur moyenne de la pression. Le coefficient de corrélation Surcote-Pression atmosphérique est de 0,44 donc relativement significatif.

La relation Surcote-Pression atmosphérique est présentée graphiquement en format  $S_{M,Q}/\delta$  Pa sur la Fig. 70. Le coefficient de régression linéaire est de -1,1. L'influence de la pression atmosphérique sur les niveaux peut donc s'apparenter à une fonction linéaire.



**Fig. 70. Tancarville : graphique  $S_{M,Q}/\delta Pa$  (à gauche) et  $P_a/\delta Pa$  des corrélations Surcote et Pression atmosphérique**

Nous retranchons à la surcote le signal issu de la pression atmosphérique selon la relation linéaire établie  $S_{Pa} = Z_{M,Q} - Z_{Pa}(S_{M,Q})$ . Le Tabl. 50 - présente les caractéristiques statistiques des deux signaux  $S_{Pa}$  et  $S_{M,Q}$ .

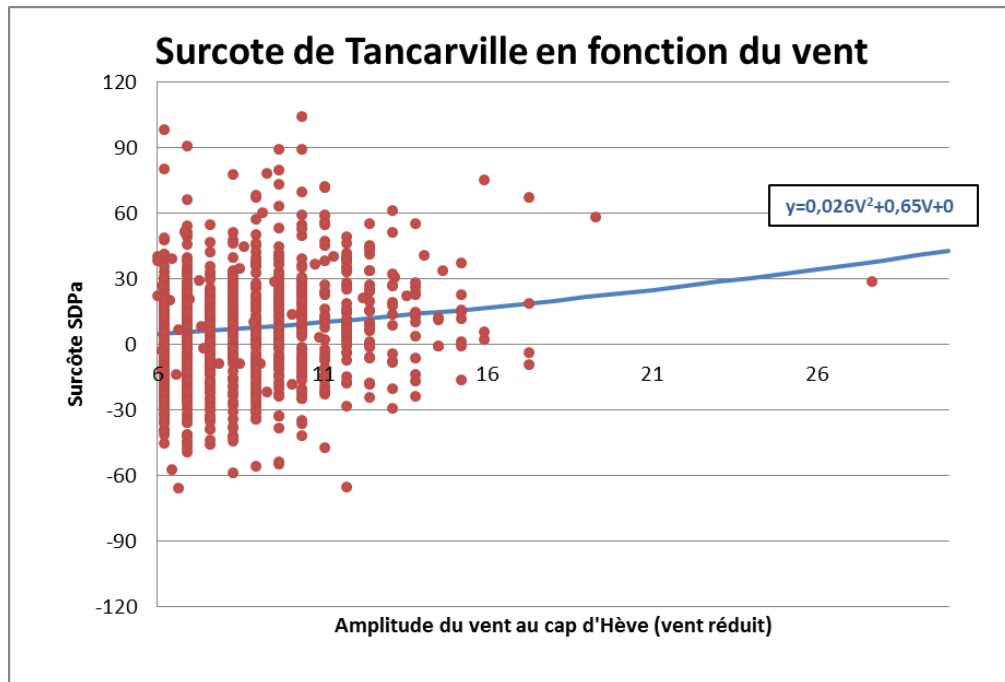
**Tabl. 45 - Tancarville - Analyse statistique des signaux  $S_{Pa}$  et  $S_{M,Q}$**

	$S_{M,Q}$	$S_{Pa}$
Ecart moyen	19.6	17.8
Ecart type	25.2	23,4
Coefficient de corrélation avec Pa	-0,44	5.E-16

Le tableau montre que le signal de surcote filtré de la pression atmosphérique est bien indépendant de la pression atmosphérique ( $\text{corr}(S_{Pa}, \delta Pa) = 0$ ).

#### 4.2.6.4. CONTRIBUTION DU VENT – MESURES

A partir du signal de surcote issu du filtrage de la pression atmosphérique  $S_{Pa}$ , une corrélation avec l'intensité du vent au Cap de la Hève (vent réduit à 10m) est réalisée. Le coefficient de corrélation Surcote  $S_{Pa}$  / Vent est de 0,24 donc légèrement significatif voire même légèrement supérieur à celui mesuré au Havre (0,2).



**Fig. 71. Tancarville : graphique S/V des corrélations Surcote  $S_{Pa}$  et Amplitude du vent réduit à 10 m au Cap de la Hève**

La relation Surcote-Amplitude du Vent est présentée graphiquement au format S/V sur la Fig. 78. Une loi de régression quadratique paraît mieux convenir qu'une régression linéaire car elle permet de capturer l'événement exceptionnel du 27 février 1990 (27,7 m/s au Havre).

Il est nécessaire cependant de remarquer que cette courbe de tendance est fortement conditionnée par la valeur extrême du 26 février 1990 qui présente une surcote assez faible de 29 cm pour un vent de 27m/s alors que la marée suivante, le 27 février, présente une surcote de 58cm pour un vent de 19m/s. Cette valeur à Tancarville de la surcote le 26 février 1990 n'est globalement pas en cohérence avec les autres observations sur l'estuaire.

Nous retranchons à la surcote le signal issu du vent selon la relation quadratique établie  $S_V = S_{Pa} - Z_V(S_{Pa})$ . Le Tabl. 46 - présente les caractéristiques statistiques des deux signaux  $S_{Pa}$  et  $S_V$ .

**Tabl. 46 - Tancarville - Analyse statistique des signaux  $S_{Pa}$  et  $S_V$**

	$S_{Pa}$	$S_V$
Ecart moyen	17.8	17.5
Ecart type	23,4	23.0
Coefficient de corrélation avec le Vent	0,20	0,07

Le tableau montre que le signal de surcote filtré de la pression atmosphérique est suffisamment indépendant de la pression atmosphérique ( $\text{corr}(S_V, V)=0,07$ ). Sa valeur, non nulle, prouve qu'il reste une relation certainement liée aux autres secteurs de vents mais il n'a pas été possible d'établir une loi de comportement sur ceux-ci faute d'événements significatifs mesurés.

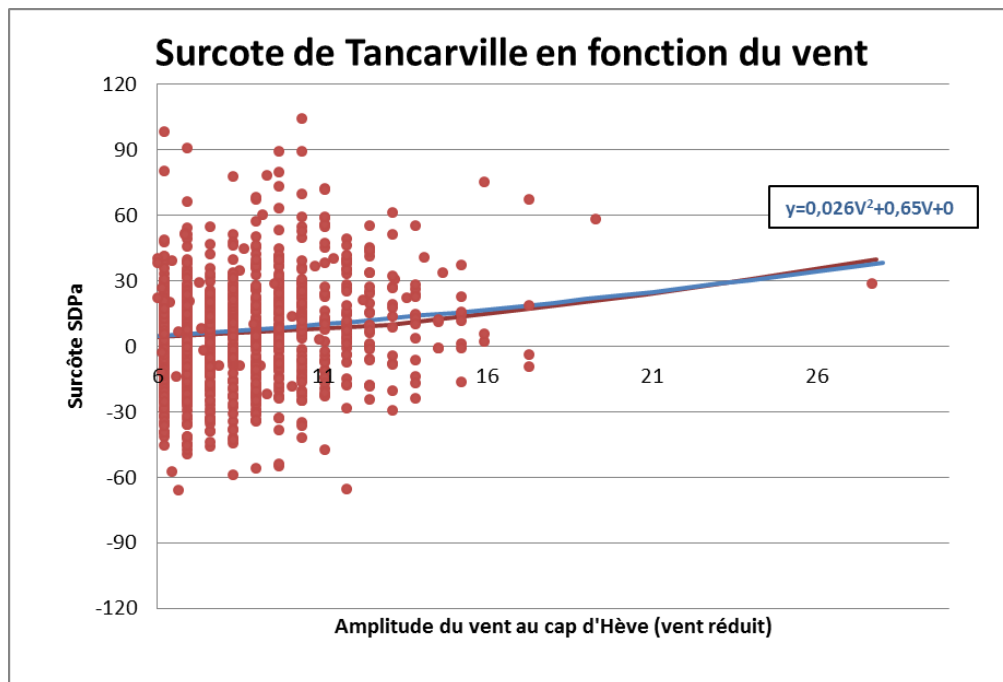
## 4.2.6.5. CONTRIBUTION DU VENT – MODELE NUMERIQUE

Comme à Rouen, la modélisation numérique est utilisée pour déterminer les effets du vent sur le gonflement de la ligne d'eau dans l'estuaire. Les données sont présentées sous forme de tableaux à Tancarville et les lignes d'eau complètes des surcotes le long de l'estuaire sont fournies en Annexe 2.

**Tabl. 47 - Tancarville – Surcote liée au gonflement de l'estuaire par le vent déterminé par modélisation**

Tancarville		Amplitude Vent				
Pk=340		13	17	20,7	24	27,7
Direction Vent	160			-8		
	180	1	2	-2	4	
	200	5	9	14	17	
	230	10	17	24	31	40
	260	12	19	29	37	
	300	9	16	23	30	

Ce tableau décrit la loi de comportement à Tancarville lié au vent en intensité et en direction sur l'estuaire. Il est donc possible de comparer ces résultats avec ceux issus de l'analyse des données. Pour cela nous reportons sur le graphe de la Fig. 71 la relation obtenue par modélisation dans le cas d'un vent dominant (Cap 230°N).



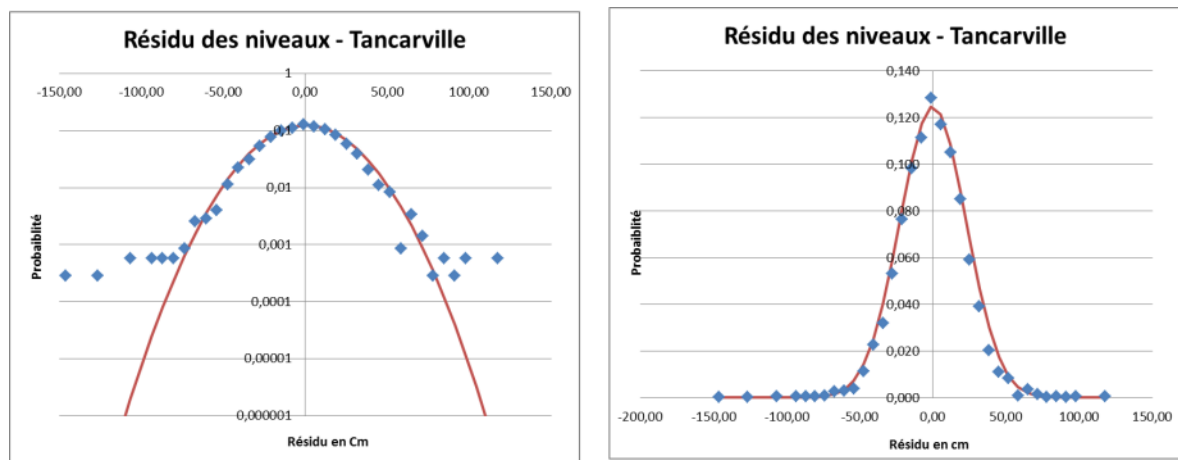
**Fig. 72. Tancarville : graphique S/V des corrélations Surcote  $S_{Pa}$  et Amplitude du vent réduit à 10 m au Cap de la Hève. Comparaison des courbes de tendances issue des données (en bleu) et issue de la modélisation (violet)**

La concordance des courbes est purement fortuite. En effet, la modélisation ne prend en compte ici que l'effet du gonflement de l'estuaire sous l'action du vent. Les données devraient prendre en compte en plus l'influence de la surcote maritime liée au vent. Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, la surcote mesurée liée au vent le plus extrême est certainement sous-estimée sur ce site.

#### 4.2.6.6. ANALYSE DU RESIDU

Le signal de surcote issu du filtrage du vent  $S_V$  est aussi dénommé résidu final. Ce résidu présente les caractéristiques décrites dans le tableau Tabl. 46 - .

Ce résidu présente une caractéristique spécifique : il suit sensiblement une loi normale (Fig. 87).



**Fig. 73. Tancarville : Distribution du résidu et loi Normale**

Cette distribution permet d'établir une loi de probabilité de la distribution du résidu.

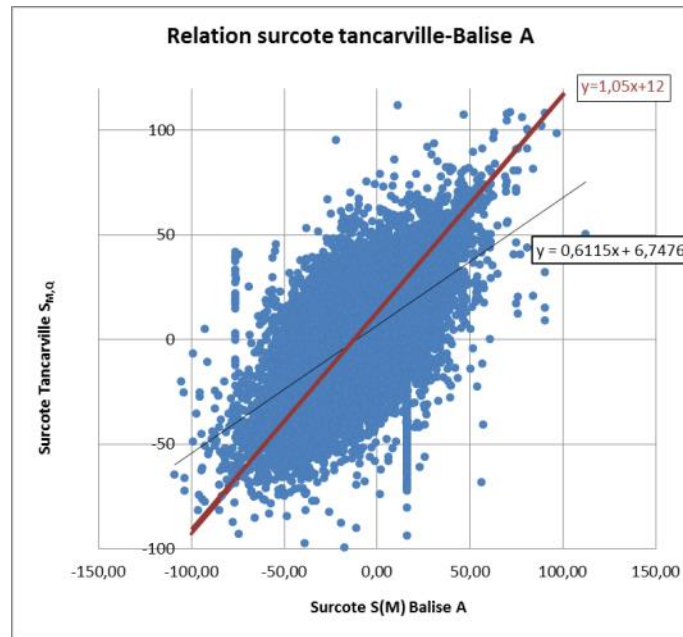
Quel est l'origine de ce résidu ? Plusieurs origines peuvent être évoquées :

- Des imprécisions sur les mesures des facteurs primaires (fréquence d'acquisition, période couverte, imprécision de la mesure même) ;
- Présence d'autres facteurs primaires tels que les apports de la nappe,
- La réalisation d'aménagements modifiant la propagation de certains facteurs primaires,
- L'évolution de la morphologie du lit de la Seine.

#### 4.2.6.7. RELATION DES SURCOTES MARINES TANCARVILLE-LE HAVRE

Les résultats de la décomposition du signal de surcote à Tancarville n'étant pas pleinement satisfaisants, notamment sur le vent, une alternative consiste à séparer surcote marine et surcote estuarienne en effectuant une corrélation entre la surcote marine au Havre et la surcote à Tancarville.

La corrélation entre les deux surcotes  $S(M)$  au Havre et  $S(M,Q)$  à Tancarville est de 0,69 donc significative. Elle est présentée sur le graphique suivant (Fig. 74). Pour autant, si la droite noire est la droite de régression directe fournie par la méthode de moindre carré, la droite rouge proposée semble plus cohérente pour les valeurs extrêmes.

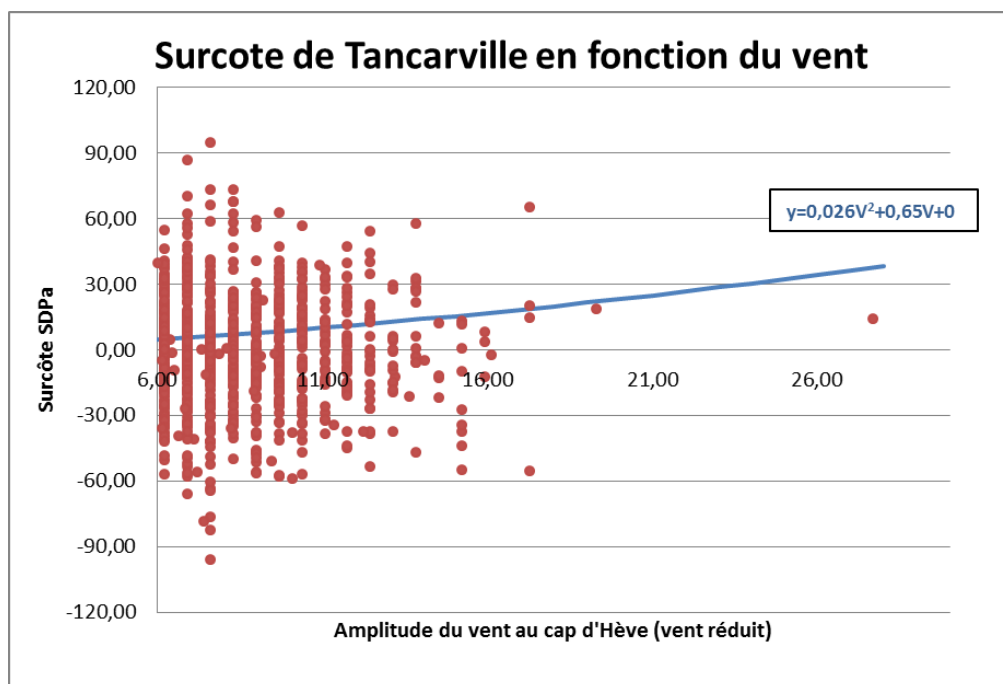


**Fig. 74. Relation des surcotes à Tancarville et des surcotes au Havre (balise A)**

Cette relation permet donc d'établir la surcote marine à Tancarville à partir de la surcote mesurée au Havre.

La surcote estuarienne restante est liée au gonflement par le vent de l'estuaire. On calcule cette surcote en retranchant à la surcote mesurée à Tancarville la surcote marine prédite par cette relation à partir de la surcote au Havre.

Cette relation surcote estuarienne –vent est présentée sur la Fig. 75.



**Fig. 75. Relation surcote estuarienne à Tancarville et vent au Cap de la Hève**



La courbe de tendance est celle proposée par la modélisation. Elle est donc assez cohérente avec le signal de surcote estuarienne sauf sur la valeur de vent la plus forte (Février 1990) comme déjà identifié.

#### 4.2.6.8. CONCLUSION

L'analyse des mesures de niveaux à partir des connaissances des facteurs primaires disponibles ont permis d'établir les lois de comportement des niveaux à Tancarville :

$$Z = Z_{M,Q} + Z_{Pa} + Z_V + \text{Res}$$

Avec :

$Z_{M,Q}$  fourni par une analyse des valeurs moyennes par tronçon

$$Z_{Pa} = -1.03\delta Pa + 6.2408$$

$$Z_V = 0.026 V_a^2 + 0.654 V_a + 0 \text{ ou issu du tableau Tabl. 47 -}$$

D'autre part, le résidu Res présente un écart moyen de 17,5 cm et suit une loi normale permettant de définir sa probabilité.

Une alternative a été proposé en corrélant la surcote à Tancarville à celle du Havre (Balise A) :

$$Z = Z_{M,Q} + Z_{maritime} + Z_v^{estuarien}$$

Avec :

$Z_{M,Q}$  fourni par une analyse des valeurs moyennes par tronçon

$$Z_{maritime} = 1.05 Z_{maritime}^{Havre} + 12$$

$$Z_v^{Estuarien} = 0.026 V_a^2 + 0.654 V_a + 0 \text{ ou issu du tableau Tabl. 47 -}$$

Le résidu gardant une structure de loi normale.

### 4.2.7. Marégraphe de Heurteauville

Les données du marégraphe de Heurteauville (Pk 297) portent sur la période du 1er avril 1985 au 6 février 2013. Ces données, fournies par le GPMR, sont filtrées par les valeurs basses (inférieures au niveau moyen) ramenées au niveau moyen.

Comme pour Rouen, il n'est pas possible de réaliser une analyse harmonique du fait de l'influence des débits qui rendent la relation niveau-marée non univoque.

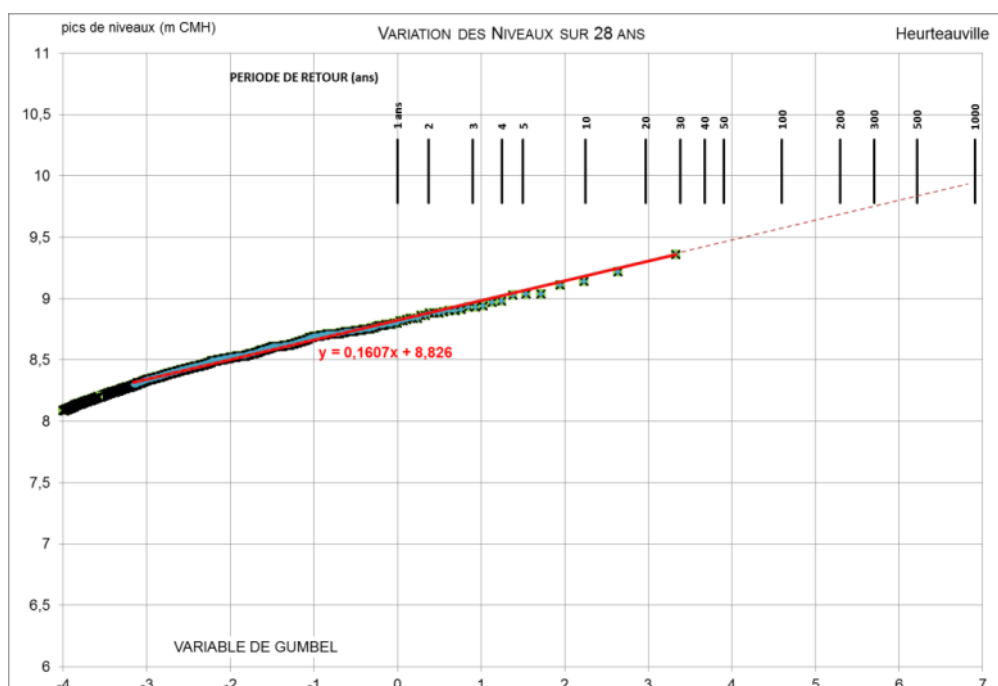
#### 4.2.7.1. ANALYSE STATISTIQUE DIRECTE DES NIVEAUX

L'analyse statistique des niveaux peut être effectuée comme l'ont fait le SHOM au Havre sur Heurteauville. La Fig. 76 montre la loi de Gumbel pour les niveaux de pleine mer sur les enregistrements marégraphiques.

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2



**Fig. 76. Distribution probabiliste des niveaux à Heurteauville sur la base des données marégraphiques**

### 4.2.7.2. CONTRIBUTION DE LA MAREE ET DES DEBITS DE LA SEINE

La fonction corrélative double  $Z_{M,Q}(Z)$  est établie par valeur moyenne par tronçon. Cette fonction est établie en fonction du débit journalier de la Seine à Poses et des niveaux de la même marée au Havre (Balise A) fournie par une prédiction (Tabl. 30 - ).

Le Tabl. 48 - montre un comportement semblable à celui de Rouen : les pics de niveau augmentent avec le débit de la Seine et avec la cote de la pleine mer au Havre. Cette relation décrit la loi de comportement  $Z_{M,Q}(Z)$ .

**Tabl. 48 - Heurteauville – Valeur moyenne des niveaux en fonction des gammes de débits et des niveaux de la marée au Havre**

Q (m <sup>3</sup> /s)	15-150	150-300	300-450	450-600	600-750	750-900	900-1050	1050-1200	1200-1350	1350-1500	1500-1650	1650-1800	1800-1950	1950-2281
Z(cm)														
624-640	640,0	625,7	630,0	635,3	627,7	648,1	645,3	641,3	647,5	658,3	666,3	663,5	669,0	770,0
640-660	624,5	638,9	638,4	648,2	655,6	670,7	670,3	675,7	670,3	684,8	695,6	690,3	688,0	707,3
660-680	645,1	654,1	658,3	662,5	671,1	679,1	689,2	693,9	685,3	701,3	708,3	721,3	711,5	730,8
680-700	661,7	671,6	674,7	677,7	688,0	696,4	710,9	707,7	712,0	734,1	723,3	740,4	750,5	728,5
700-720	688,1	688,0	692,8	694,5	707,0	712,0	725,8	711,0	730,6	738,8	751,3	753,4	755,6	759,3
720-740	697,3	702,4	709,8	710,5	723,5	731,0	737,7	732,4	741,6	767,5	766,5	761,5	791,8	793,2
740-760	715,9	719,5	727,7	726,0	740,7	747,0	748,9	748,4	760,3	767,8	789,6	787,9	792,1	799,7
760-780	737,7	736,5	743,0	745,8	751,8	762,7	770,4	767,3	781,0	788,6	805,0	812,6	809,3	838,2
780-800	749,7	752,4	759,8	761,4	769,0	779,7	779,6	789,5	790,2	808,0	819,6	825,1	829,8	844,8
800-820	759,5	771,3	776,3	781,8	789,3	789,7	802,6	804,7	807,8	835,4	828,9	831,3	861,5	865,0

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

Q (m <sup>3</sup> /s)	15-150	150-300	300-450	450-600	600-750	750-900	900-1050	1050-1200	1200-1350	1350-1500	1500-1650	1650-1800	1800-1950	1950-2281
Z(cm)														
820-840	769,9	787,3	792,8	797,1	798,9	809,4	819,8	830,0	822,8	844,4	839,4	889,0	852,3	865,2
840-894	808,4	807,2	810,5	813,0	808,9	822,4	834,5	850,7	836,1	838,2	810,0	883,5	866,0	872,5

L'écart moyen des observations autour de la loi de comportement  $Z_{M,Q}(Z)$  est de 18,1 cm, très proche de celui mesuré au Havre (Balise A : 17,6 cm).

Nous pouvons ainsi déterminer la surcote à Heurteville par une interpolation bilinéaire du Tabl. 31 - :  $S_{M,Q} = Z - Z_{M,Q}(Z)$ .

Là encore, le résidu présente un écart moyen et un écart type semblables à ceux observés sur le Havre (Tabl. 49 -).

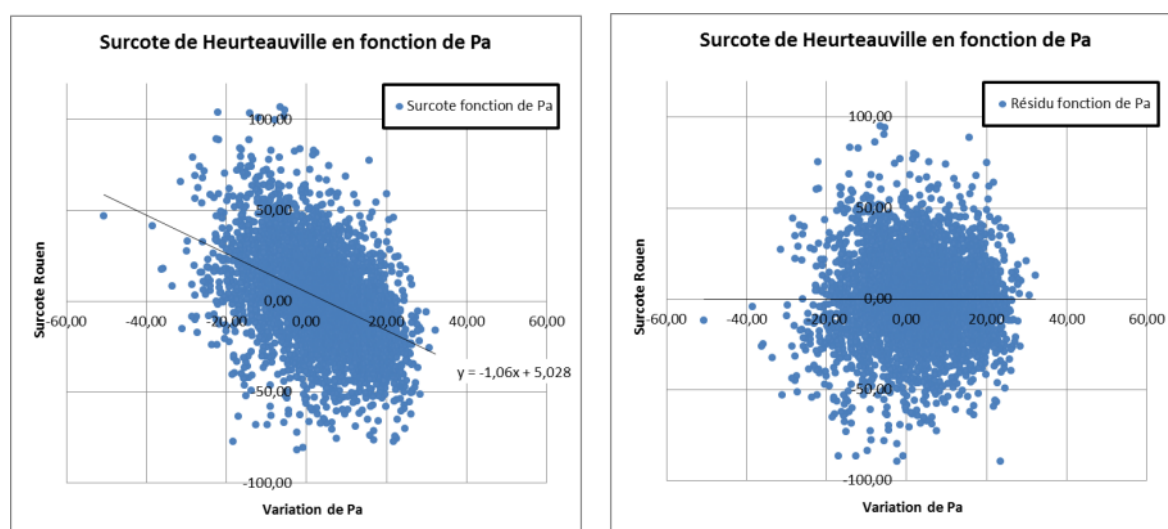
**Tabl. 49 - Heurteville – Statistiques de SM,Q**

	1985-2013
Ecart moyen de $S_{M,Q}$ (cm)	19.66
Ecart type de $S_{M,Q}$ (cm)	25.23

### 4.2.7.3. CONTRIBUTION DE LA PRESSION ATMOSPHERIQUE

A partir du signal de surcote issu de la marée et du débit de la Seine, une corrélation avec la variation de pression atmosphérique au Havre est réalisée. La variation de la pression atmosphérique est obtenue en retranchant à la pression atmosphérique la valeur moyenne de la pression. Le coefficient de corrélation Surcote-Pression atmosphérique est de 0,41 donc relativement significatif.

La relation Surcote-Pression atmosphérique est présentée graphiquement en format  $S_{M,Q}/\delta Pa$  sur la Fig. 77. Le coefficient de régression linéaire est de -1,1. L'influence de la pression atmosphérique sur les niveaux peut donc s'apparenter à une fonction linéaire.



**Fig. 77. Heurteville : graphique  $S_{M,Q}/\delta Pa$  des corrélations Surcote et Pression atmosphérique**

Nous retranchons à la surcote le signal issu de la pression atmosphérique selon la relation linéaire établie  $S_{Pa} = S_{M,Q} - Z_{Pa}(S_{M,Q})$ . Le Tabl. 50 - présente les caractéristiques statistiques des deux signaux  $S_{Pa}$  et  $S_{M,Q}$ .

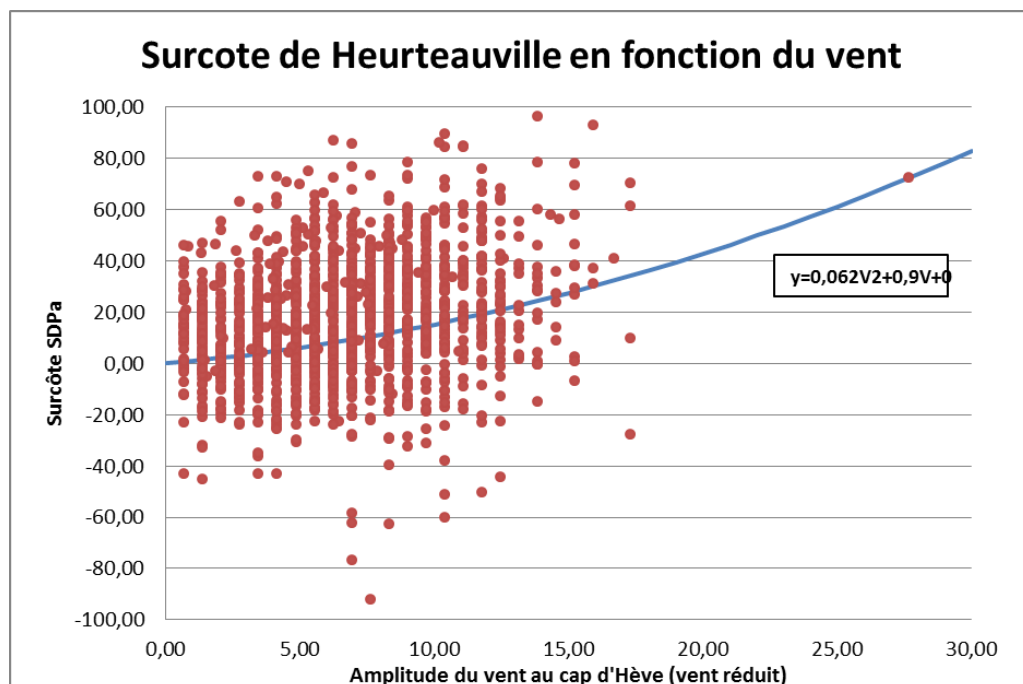
**Tabl. 50 - Heurteauville - Analyse statistique des signaux  $S_{Pa}$  et  $S_{M,Q}$**

	$S_{M,Q}$	$S_{Pa}$
Ecart moyen	19.6	18,3
Ecart type	25.2	24.3
Coefficient de corrélation avec Pa	-0,41	4E-02

Le tableau montre que le signal de surcote filtré de la pression atmosphérique est bien indépendant de la pression atmosphérique ( $\text{corr}(S_{Pa}, \delta Pa) = 0$ ).

#### 4.2.7.4. CONTRIBUTION DU VENT – MESURES

A partir du signal de surcote issu du filtrage de la pression atmosphérique  $S_{Pa}$ , une corrélation avec l'intensité du vent au Cap de la Hève (vent réduit à 10m) est réalisée. Le coefficient de corrélation Surcote  $S_{Pa}$  / Vent est de 0,24 donc légèrement significatif voire même légèrement supérieur à celui mesuré au Havre (0,2).



**Fig. 78. Heurteauville : graphique S/V des corrélations Surcote  $S_{Pa}$  et Amplitude du vent réduit à 10 m au Cap de la Hève**

La relation Surcote-Amplitude du Vent est présentée graphiquement au format S/V sur la Fig. 78. Une loi de régression quadratique paraît mieux convenir qu'une régression linéaire car elle permet de capturer l'événement exceptionnel du 27 février 1990 (27,7 m/s au Havre).

Nous retranchons à la surcote le signal issu du vent selon la relation quadratique établie  $S_V = S_{Pa} - Z_V(S_{Pa})$ . Le Tabl. 51 - présente les caractéristiques statistiques des deux signaux  $S_{Pa}$  et  $S_V$ .

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

**Tabl. 51 - Heurteauville - Analyse statistique des signaux  $S_{Pa}$  et  $S_V$**

	$S_{Pa}$	$S_V$
Ecart moyen	18,3	17.8
Ecart type	24,3	23.5
Coefficient de corrélation avec le Vent	0,24	0,03

Le tableau montre que le signal de surcote filtré de la pression atmosphérique est suffisamment indépendant de la pression atmosphérique ( $\text{corr}(S_V, V)=0,03$ ). Sa valeur, non nulle, prouve qu'il reste une relation certainement liée aux autres secteurs de vents mais il n'a pas été possible d'établir une loi de comportement sur ceux-ci faute d'événements significatifs mesurés.

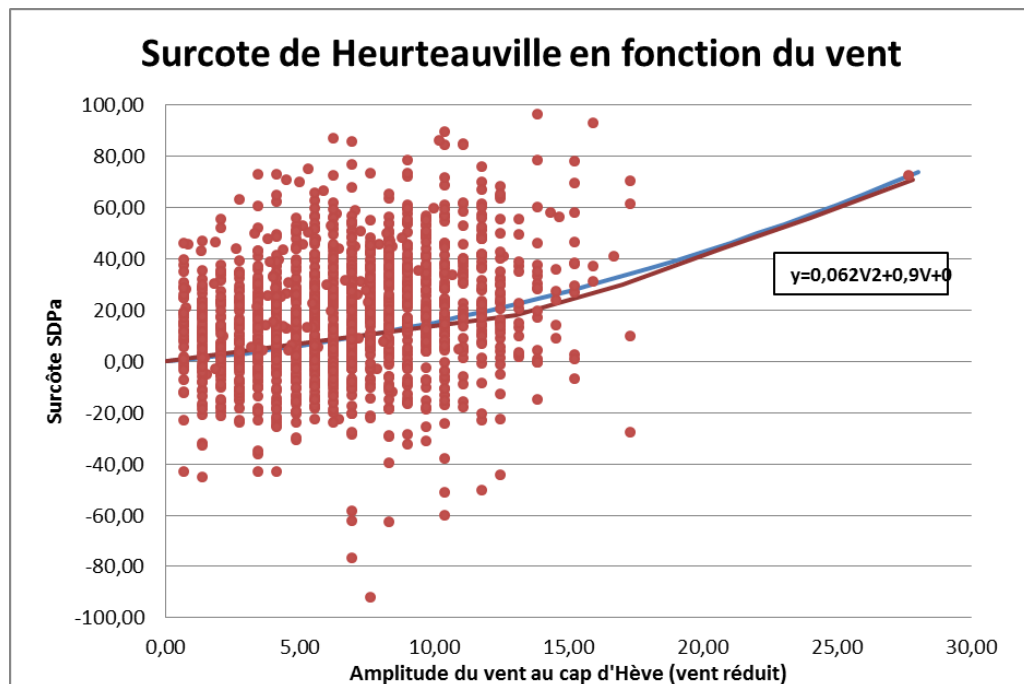
### 4.2.7.5. CONTRIBUTION DU VENT – MODELE NUMERIQUE

La modélisation numérique est utilisée pour déterminer les effets du vent sur le gonflement de la ligne d'eau dans l'estuaire. Les données sont présentées sous forme de tableaux à Heurteauville. Les lignes d'eau complètes des surcotes le long de l'estuaire sont fournies en Annexe 2.

**Tabl. 52 - Heurteauville – Surcote liée au gonflement de l'estuaire par le vent déterminée par modélisation**

Heurteauville		Amplitude Vent				
Pk=297		13	17	20,7	24	27,7
Direction Vent	160			-21		
	180	0	0	-2	-1	
	200	8	14	20	26	
	230	18	30	44	56	71
	260	23	38	56	72	
	300	21	34	50	64	

Ce tableau décrit la loi de comportement à Heurteauville liée au vent sur l'estuaire en fonction de l'intensité du vent et de sa direction. Il est donc possible de comparer ces résultats avec ceux issus de l'analyse des données. Pour cela, nous reportons sur le graphe de la Fig. 71 la relation obtenue par modélisation dans le cas d'un vent dominant (Cap 230°N).



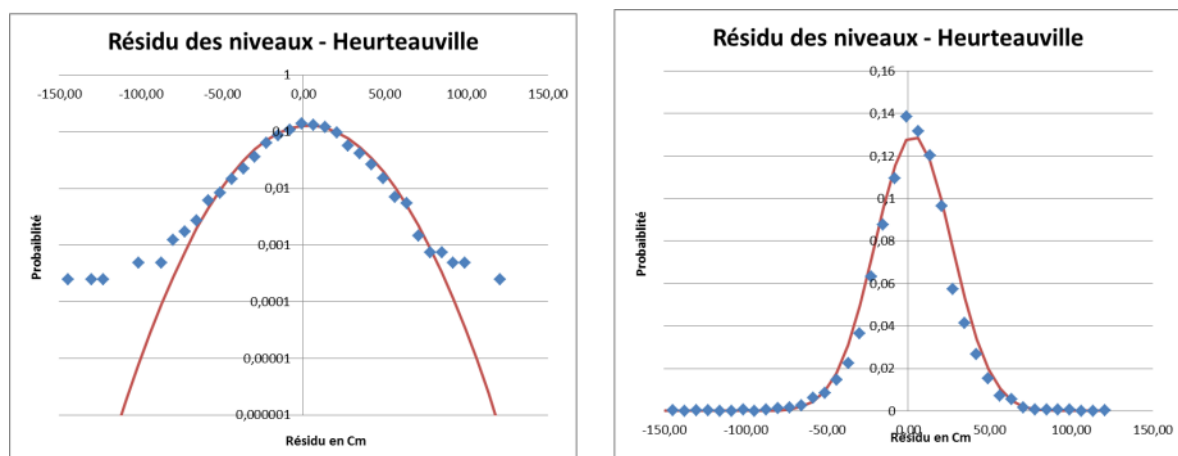
**Fig. 79. Heurteauville : graphique S/V des corrélations Surcote  $S_{Pa}$  et Amplitude du vent réduit à 10 m au Cap de la Hève. Comparaison des courbes de tendances issue des données (en bleu) et issue de la modélisation (en violet)**

La concordance des courbes est excellente dans la mesure où l'on peut considérer que l'influence de la surcote maritime est faible contrairement à Tancarville.

#### 4.2.7.6. ANALYSE DU RESIDU

Le signal de surcote issue du filtrage du vent  $S_V$  est aussi dénommé résidu final. Ce résidu présente les caractéristiques décrites dans le tableau Tabl. 51 - .

Ce résidu possède une caractéristique spécifique : il suit sensiblement une loi normale (Fig. 80).



**Fig. 80. Elbeuf : Distribution du résidu et loi Normale**

Cette distribution permet d'établir une loi de probabilité de sa distribution.

Quel est l'origine de ce résidu ? Plusieurs origines peuvent être évoquées :

- Des imprécisions sur les mesures des facteurs primaires (fréquence d'acquisition, période couverte, imprécision de la mesure même) ;
- Présence d'autres facteurs primaires tels que les apports de la nappe,
- La réalisation d'aménagements modifiant la propagation de certains facteurs primaires,
- L'évolution de la morphologie du lit de la Seine.

#### 4.2.7.7. CONCLUSION

L'analyse des mesures de niveaux à partir des connaissances des facteurs primaires disponibles a permis d'établir les lois de comportement des niveaux à Heurteauville :

$$Z = Z_{M,Q} + Z_{Pa} + Z_V + Res$$

Avec :

$Z_{M,Q}$  fourni par une analyse des valeurs moyennes par tronçon

$$Z_{Pa} = -1.06\delta Pa + 5,028$$

$$Z_V = 0.062 V_a^2 + 0.9V_a + 0 \quad \text{ou issu du Tabl. 52 -}$$

D'autre part, le résidu Res présente un écart moyen de 18 cm et suit une loi normale permettant de définir sa probabilité.

#### 4.2.8. Marégraphe de Elbeuf

Les données du marégraphe d'Elbeuf portent sur la période du 1 mai 1993 au 5 février 2013. Ces données, fournies par le GPMR, sont filtrées par les valeurs basses (inférieures au niveau moyen) ramenées au niveau moyen.

Comme pour Rouen, il n'est pas possible de réaliser une analyse harmonique du fait de l'influence des débits qui rend la relation niveau-marée non univoque.

##### 4.2.8.1. ANALYSE STATISTIQUE DIRECTE DES NIVEAUX

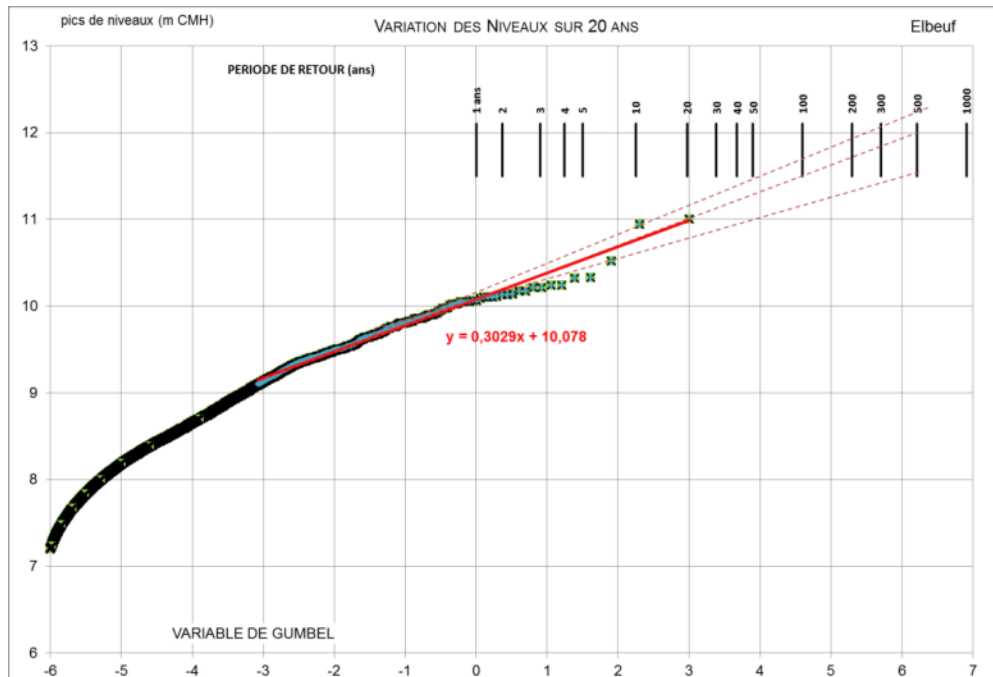
L'analyse statistique des niveaux peut être effectuée comme l'ont fait le SHOM au Havre sur Elbeuf. La Fig. 81 présente la loi de Gumbel pour les niveaux de pleine mer sur les enregistrements marégraphiques.

Du fait d'une durée plus courte d'enregistrement, on constate une certaine imprécision sur la période de retour des événements les plus importants. Nous avons reporté deux courbes pointillées de loi de comportement statistique des niveaux aussi probable que la médiane en trait plein. Cette variabilité fourni à titre d'exemple une probabilité pour l'événement centennal allant de 11,12 à 11,7m CMH, avec une valeur référente proposée basée sur l'évènement le plus important enregistré à 11,46m CMH.

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2



**Fig. 81. Distribution probabiliste des niveaux à Elbeuf sur la base des données marégraphiques.**

### 4.2.8.2. CONTRIBUTION DE LA MAREE ET DES DEBITS DE LA SEINE

La fonction corrélative double  $Z_{M,Q}(Z)$  est établie par valeur moyenne par tronçon. Cette fonction est établie en fonction du débit journalier de la Seine à Poses et des niveaux de la même marée au Havre (Balise A) fournie par une prédiction (Tabl. 30 - ) et selon la méthode asynchrone.

Pour ce type d'analyse, la maîtrise du tableau d'occurrence est une clef essentielle. Il convient donc que chaque cellule possède un nombre représentatif d'événements ou la valeur moyenne risque de ne pas être très représentative. La longueur de l'enregistrement est donc un élément important de la précision de cette analyse. Plus l'enregistrement sera court, plus la discrétisation en débit et en niveau sera grossière, surtout dans les valeurs extrêmes. En conséquence, la discrétisation de l'analyse sur Elbeuf est moins fine que celle de Heurteauville et de Rouen.

Le Tabl. 53 - montre un comportement semblable à celui de Rouen : les pics de niveau augmentent avec le débit de la Seine et avec la cote de la pleine mer au Havre. Cette relation décrit la loi de comportement  $Z_{M,Q}(Z)$ .

**Tabl. 53 - Elbeuf – Valeur moyenne des niveaux en fonction des gammes de débits et des niveaux de la marée au Havre en cm CMH**

Q (m <sup>3</sup> /s)	15-150	150-300	300-450	450-600	600-750	750-900	900-1050	1050-1200	1200-1350	1350-2281
Z(cm)										
624-660	650,0	670,0	703,1	720,3	765,0	795,8	812,9	850,0	870,0	
660-680	698,1	715,0	727,5	746,5	769,0	804,3	832,1	857,0	880,0	940,0
680-700	713,9	726,4	744,4	761,8	787,9	819,6	837,5	856,3	870,8	943,0
700-720	742,3	742,0	756,4	775,9	807,0	827,3	844,9	860,0	881,2	945,0
720-740	746,4	752,5	773,8	788,6	821,1	841,2	858,2	875,0	888,6	946,4



## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

Q (m <sup>3</sup> /s)	15-150	150-300	300-450	450-600	600-750	750-900	900-1050	1050-1200	1200-1350	1350-2281
Z(cm)										
740-760	761,1	765,7	787,9	802,9	835,8	855,0	862,7	894,0	910,7	963,8
760-780	774,3	779,8	799,5	817,9	841,5	862,0	890,7	899,9	925,0	958,8
780-800	781,3	791,8	815,4	835,4	858,6	882,5	895,1	921,8	930,8	976,8
800-820	816,0	810,5	829,8	849,7	874,2	893,6	913,3	924,0	924,2	995,7
820-840	824,8	818,2	838,4	866,1	887,2	904,8	925,0	935,4	950,0	999,7
840-894	830,2	837,1	850,4	884,0	895,0	908,4	934,3	947,0	960,0	1010,0

L'écart moyen des observations autour de la loi de comportement  $Z_{M,Q}(Z)$  est de 19,2 cm, proche de celui mesuré aux autres stations.

Nous pouvons ainsi déterminer la surcote à Elbeuf par une interpolation bilinéaire du Tabl. 53 - Tabl. 31 -  $S_{M,Q} = Z - Z_{M,Q}(Z)$ .

Là encore, le résidu présente un écart moyen et un écart type semblables à ceux observés sur le Havre (Tabl. 54 - ).

**Tabl. 54 - Elbeuf – Statistiques de SM,Q**

	1993-2013
Ecart moyen de $S_{M,Q}$ (cm)	19.2
Ecart type de $S_{M,Q}$ (cm)	24,9

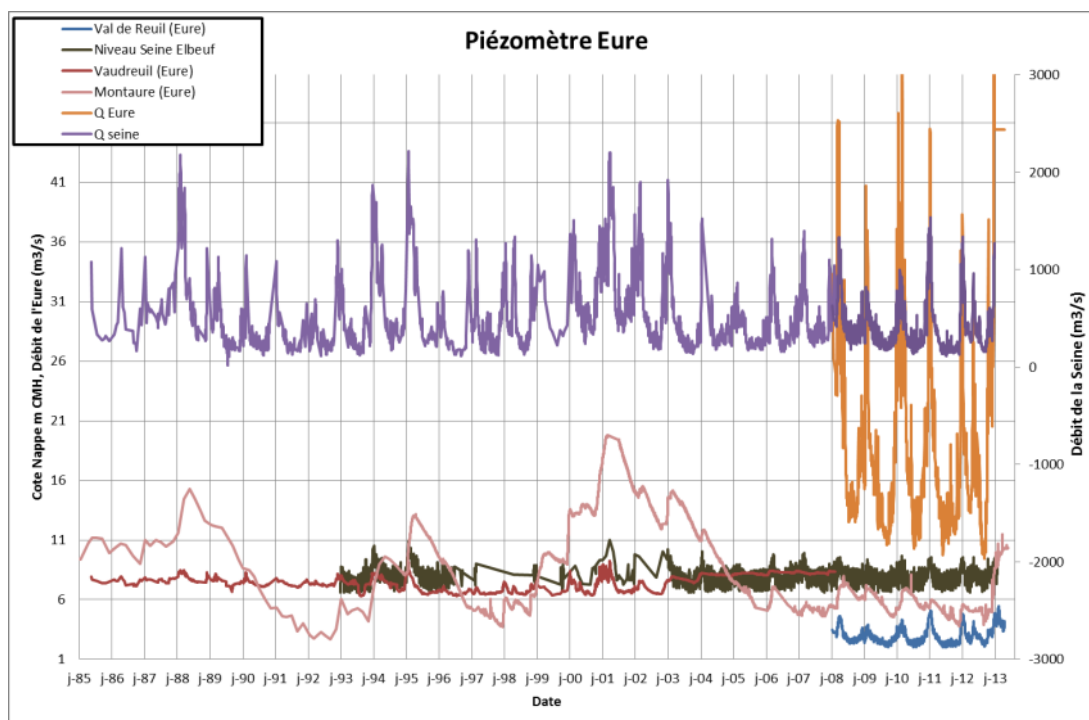
### 4.2.8.3. RELATION AVEC LE BASSIN DE L'EURE

L'influence des apports de la nappe de la Craie liés au bassin de l'Eure sur les niveaux observés à Elbeuf est analysée ci-après. Nous reportons sur la Fig. 82 le signal des niveaux et des débits de la Seine par rapport aux niveaux de la nappe et des débits de la rivière Eure.

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2



**Fig. 82. Bassin de l'Eure : niveaux et débits de la Seine par rapport aux niveaux de la nappe et des débits de la rivière Eure**

La relation entre les différents niveaux et débits est assez marquée :

- Débits de la Seine – débit de l'Eure :

Sur les stations de Vaudreuil et de Val de Reuil, la corrélation entre le débit de la Seine et le débit de l'Eure est supérieure à 0,8. Ceci signifie que les crues sont fortement concomitantes.

- Niveau de la Seine – Niveau de la Nappe :

Les corrélations sont les suivantes :

	Piézomètre Vaudreuil	Piézomètre Val de Reuil	Piézomètre Montaure
Niveau Seine	0.66	0.09	0.1

La corrélation sur Val de Reuil n'est certainement pas significative au vu de la caractéristique du signal après 2002.

La corrélation avec Vaudreuil est forte même si elle est établie sur une période courte de 4 ans. Elle est caractéristique des relations nappe-rivière dans les réseaux karstiques, en fait plus significatif de la connexion directe des eaux par les rivières souterraines que synonyme d'une alimentation par la nappe.

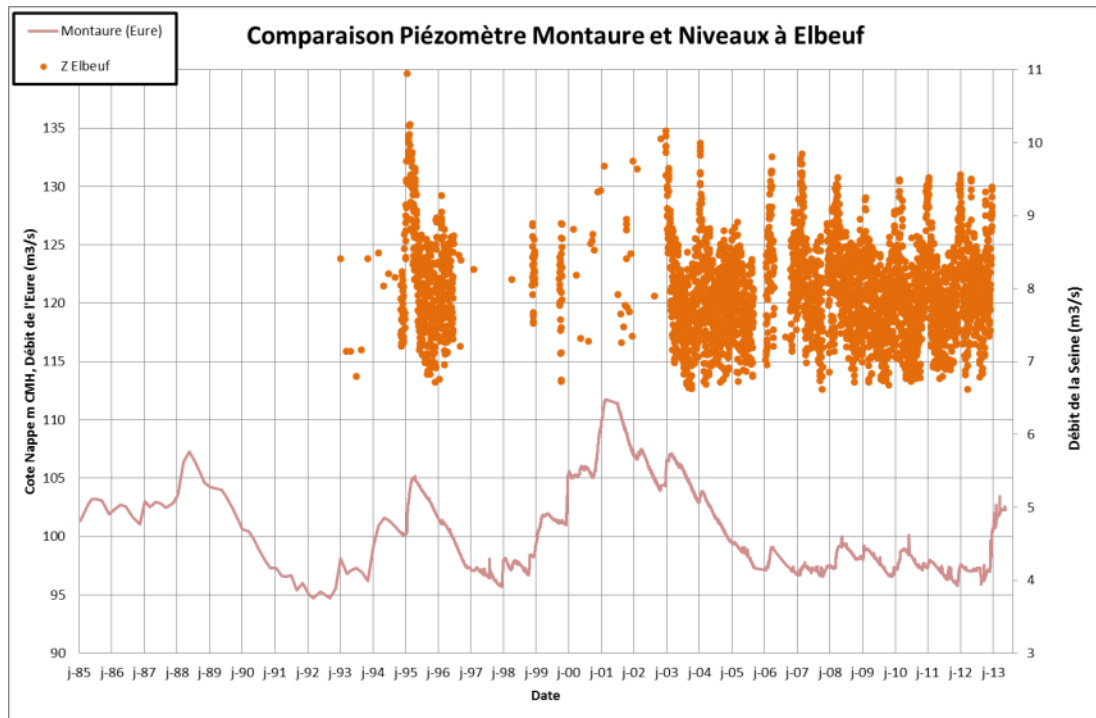
La corrélation avec Montaure est faible ; pour autant, une analyse plus détaillée montre une forte incertitude (Fig. 83) : en effet nous ne disposons de peu de données concomitantes sur la période où la nappe de l'Eure présente des niveaux significatifs. Les observations sur la période de 1994-1996 ainsi que sur la période 2003-2005 sur les valeurs des plus hauts niveaux observés à Elbeuf peuvent laisser supposer une influence des apports de nappes.

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

Sur la base de ces seuls éléments, il est impossible d'établir une loi de corrélation qui nous permettrait d'exploiter des données piézométriques comme facteur dominant des niveaux observés. Pour autant, l'accord visuel pourrait suggérer qu'il est nécessaire de disposer d'un niveau important de la nappe pour que l'effet soit sensible sur les niveaux à Elbeuf, ce qui se traduirait par un niveau de nappe à Montauve dépassant les 103m environ.



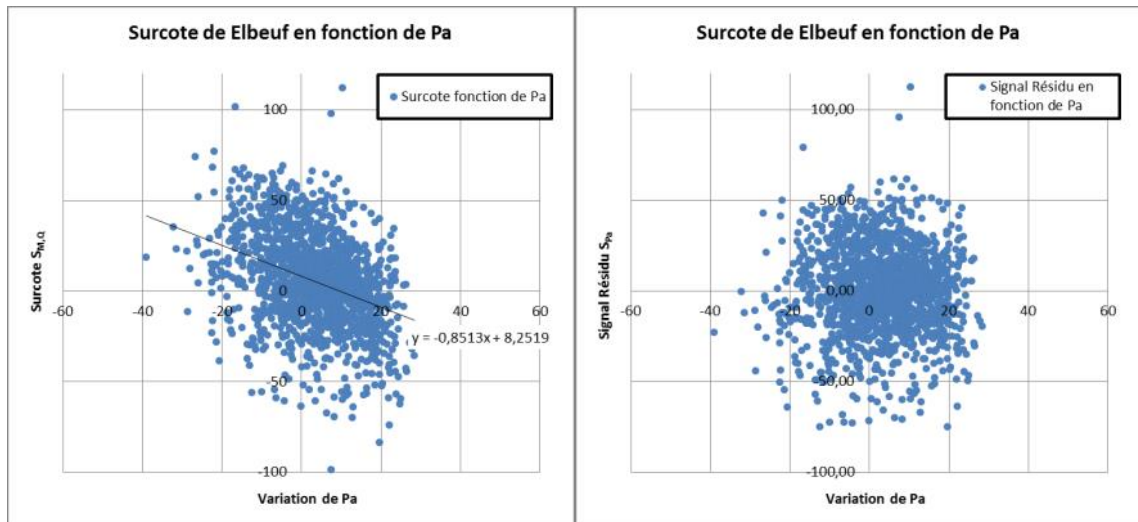
**Fig. 83. Bassin de l'Eure : niveaux de la Seine à Elbeuf et niveau du piézomètre à Montauve**

En synthèse, il est difficile d'établir un lien entre niveaux de la nappe et niveaux observés et aucune loi de comportement ne peut être établie.

#### 4.2.8.4. CONTRIBUTION DE LA PRESSION ATMOSPHERIQUE

A partir du signal de surcote issu de la marée et du débit de la Seine, une corrélation avec la variation de pression atmosphérique au Havre est réalisée. La variation de la pression atmosphérique est obtenue en retranchant à la pression atmosphérique la valeur moyenne de la pression. Le coefficient de corrélation Surcote-Pression atmosphérique est de 0,35 donc un peu moins significatif que sur Rouen par exemple.

La relation Surcote-Pression atmosphérique est présentée graphiquement en format  $S_{M,Q}/\delta$  Pa sur la Fig. 84. Le coefficient de régression linéaire est de -0.85. L'influence de la pression atmosphérique sur les niveaux peut donc s'apparenter à une fonction linéaire.



**Fig. 84. Elbeuf : graphique  $S_{M,Q}/\delta Pa$  (à gauche) et  $S_{Pa}/\delta Pa$  des corrélations Surcote et Pression atmosphérique**

A droite de la Fig. 84, est représentée la surcote du signal issu de la pression atmosphérique selon la relation linéaire établie  $S_{Pa} = S_{M,Q} - Z_{Pa}(S_{M,Q})$ . Le Tabl. 55 - présente les caractéristiques statistiques des deux signaux  $S_{Pa}$  et  $S_{M,Q}$ .

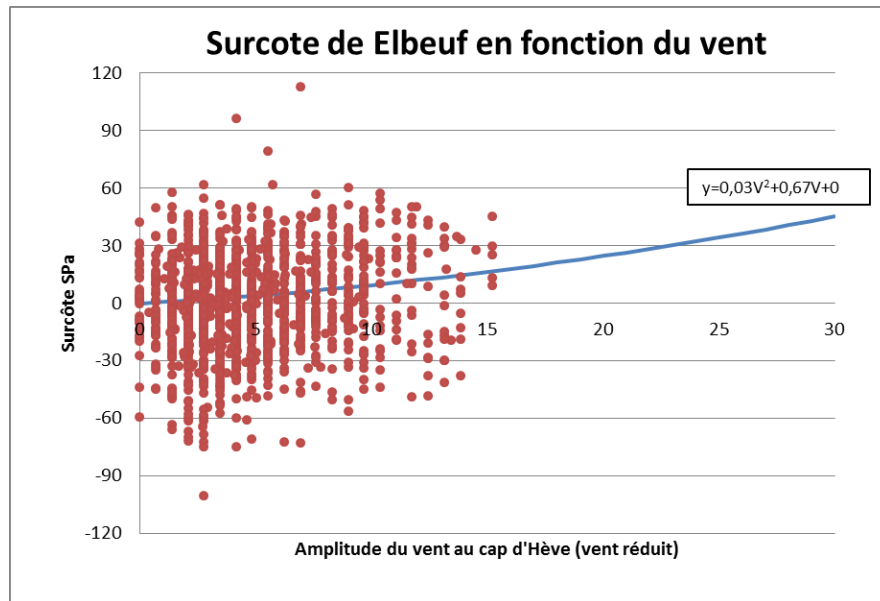
**Tabl. 55 - Elbeuf - Analyse statistique des signaux  $S_{Pa}$  et  $S_{M,Q}$**

	$S_{M,Q}$	$S_{Pa}$
Ecart moyen	19,2	19,09
Ecart type	24,9	24,76
Coefficient de corrélation avec Pa	-0,35	3E-15

Le tableau montre que le signal de surcote filtré de la pression atmosphérique est bien indépendant de la pression atmosphérique ( $\text{corr}(S_{Pa}, \delta Pa) = 0$ ).

#### 4.2.8.5. CONTRIBUTION DU VENT – MESURES

A partir du signal de surcote issu du filtrage de la pression atmosphérique  $S_{Pa}$ , une corrélation avec l'intensité du vent au Cap de la Hève (vent réduit à 10m) est réalisée. Le coefficient de corrélation Surcote  $S_{Pa}$  / Vent est de 0,194 donc faiblement significatif. Ceci se retrouve sur la courbe de relation entre surcote et vent (Fig. 85) où la courbe de tendance est difficile à déterminer et fortement incertaine. Une loi de régression quadratique sur l'ensemble du jeu de données a été élaborée et est représentée sur Fig. 85 en bleu.



**Fig. 85. Elbeuf : graphique S/V des corrélations Surcote  $S_{Pa}$  et Amplitude du vent réduit à 10 m au Cap de la Hève**

La raison de cette incertitude est probablement liée au nombre de données disponibles insuffisant et au manque de données de vents pour les événements extrêmes.

Nous retranchons à la surcote le signal issu du vent selon la relation quadratique établie  $S_V = S_{Pa} - Z_V(S_{Pa})$ . Le Tabl. 56 - présente les caractéristiques statistiques des deux signaux  $S_{Pa}$  et  $S_V$ .

**Tabl. 56 - Elbeuf- Analyse statistique des signaux  $S_{Pa}$  et  $S_V$**

	$S_{Pa}$	$S_V$
Ecart moyen	19,1	19
Ecart type	24,8	24,6
Coefficient de corrélation avec le Vent	0,194	0,002

Le tableau montre que le signal de surcote filtré de l'influence du vent est indépendant du vent lui-même ( $\text{corr}(S_V, V)=0,002$ ).

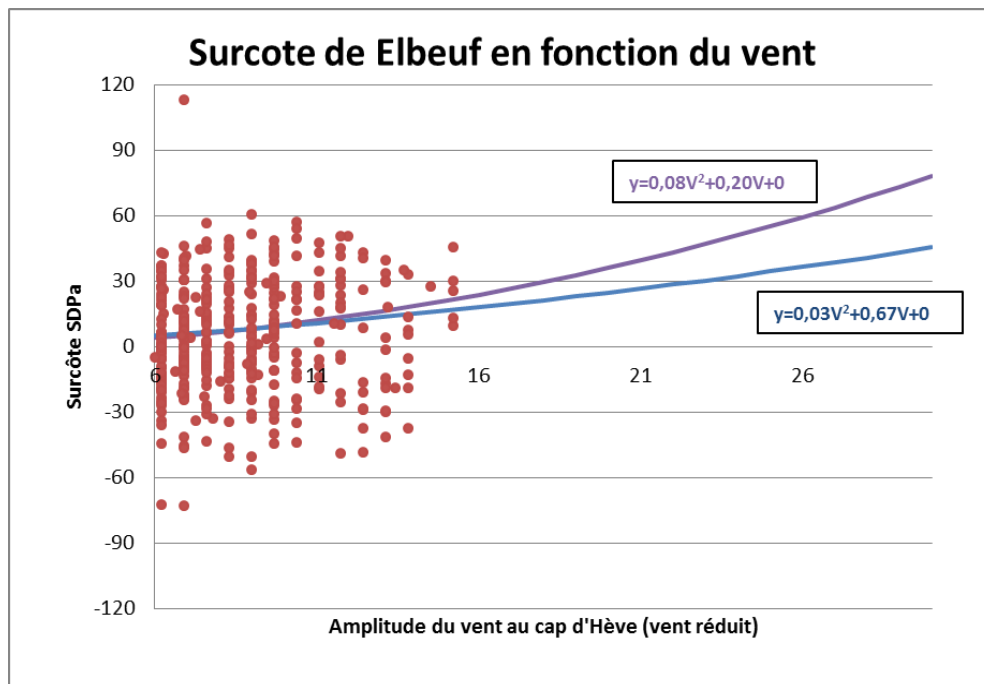
#### 4.2.8.6. CONTRIBUTION DU VENT – MODELE NUMERIQUE

La modélisation numérique est utilisée pour déterminer les effets du vent sur le gonflement de la ligne d'eau dans l'estuaire. Les données sont présentées sous forme de tableaux à Elbeuf. Les lignes d'eau complètes des surcotes le long de l'estuaire sont fournies en Annexe 2.

**Tabl. 57 - Elbeuf – Surcote liée au gonflement de l'estuaire par le vent, déterminée par modélisation**

Elbeuf Pk=219	Amplitude Vent				
	13	17	20,7	24	27,7
Direction Vent 160			-48		
180	-9	-16	-2	-31	
200	1	2	3	4	
230	16	27	40	52	67
260	27	44	66	84	
300	29	48	73	92	

Ce tableau décrit la loi de comportement à Elbeuf liée à l'action du vent sur l'estuaire en fonction de l'intensité du vent et de sa direction. Il est donc possible de comparer ces résultats avec ceux issus de l'analyse des données. Pour cela nous reportons sur le graphe de la Fig. 71 la relation obtenue par modélisation dans le cas d'un vent dominant (Cap 230°N).



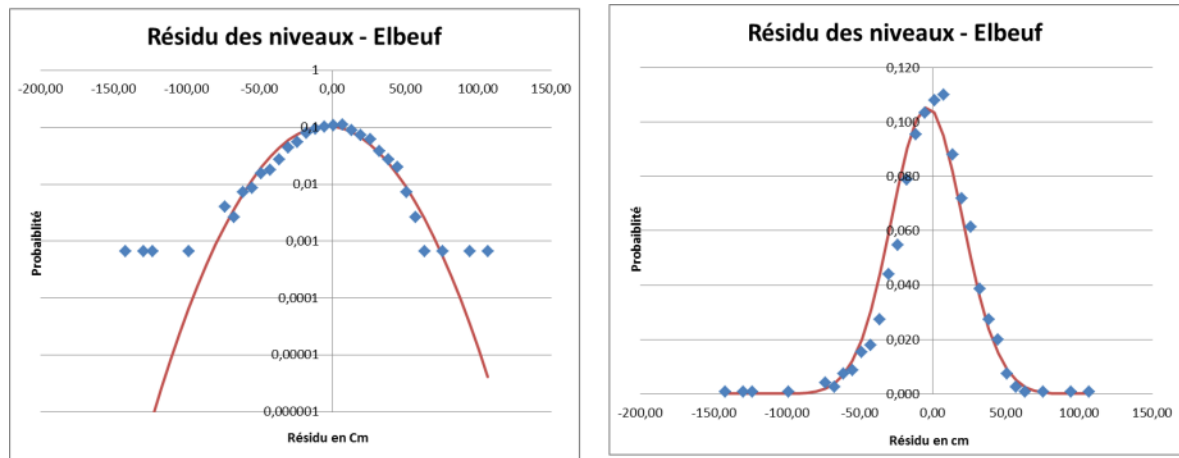
**Fig. 86. Elbeuf : graphique S/V des corrélations Surcote  $S_{Pa}$  et Amplitude du vent réduit à 10 m au Cap de la Hève – comparaison des courbes de tendance (bleu) et des résultats de la modélisation pour le cap dominant (violet)**

On note un écart assez important au-delà de 16m/s. Cette différence s'explique par le poids important dans l'évaluation des courbes de tendance sur les autres sites de la valeur extrême observée (février 1990) qui n'a pas été mesurée sur cette station. A noter que cette courbe de tendance décrite par la modélisation semble plus en accord avec celles de Rouen à la fois obtenues par mesures et par modélisation.

#### 4.2.8.7. ANALYSE DU RESIDU

Le signal de surcote issu du filtrage du vent  $S_V$  est aussi dénommé résidu final. Ce résidu présente les caractéristiques décrites dans le tableau Tabl. 56 - .

Ce résidu possède une caractéristique spécifique : il suit sensiblement une loi normale (Fig. 87).



**Fig. 87. Elbeuf : Distribution du résidu et loi Normale**

On note cependant une imprécision dans les valeurs hautes qui confirme la difficulté d'établir des lois de comportement sur un échantillon de données court.

Cette distribution permettra d'établir une loi de probabilité de sa distribution.

Quel est l'origine de ce résidu ? Plusieurs origines peuvent être évoquées :

- Des imprécisions sur les mesures des facteurs primaires (fréquence d'acquisition, période couverte, imprécision de la mesure même) ;
- Présence d'autres facteurs primaires tels que les apports de la nappe,
- La réalisation d'aménagements modifiant la propagation de certains facteurs primaires,
- L'évolution de la morphologie du lit de la Seine.

#### 4.2.8.8. CONCLUSION

L'analyse des mesures de niveaux à partir des connaissances des facteurs primaires disponibles a permis d'établir les lois de comportement des niveaux à Elbeuf :

$$Z = Z_{M,Q} + Z_{Pa} + Z_V + Res$$

Avec :

$Z_{M,Q}$  fourni par une analyse des valeurs moyennes par tronçon

$$Z_{Pa} = -0.8513\delta Pa + 8.2519$$

$Z_V = 0.08 V_a^2 + 0.20V + 0$  telle que décrite par la modélisation

On note cependant une forte incertitude sur la loi de comportement du vent.

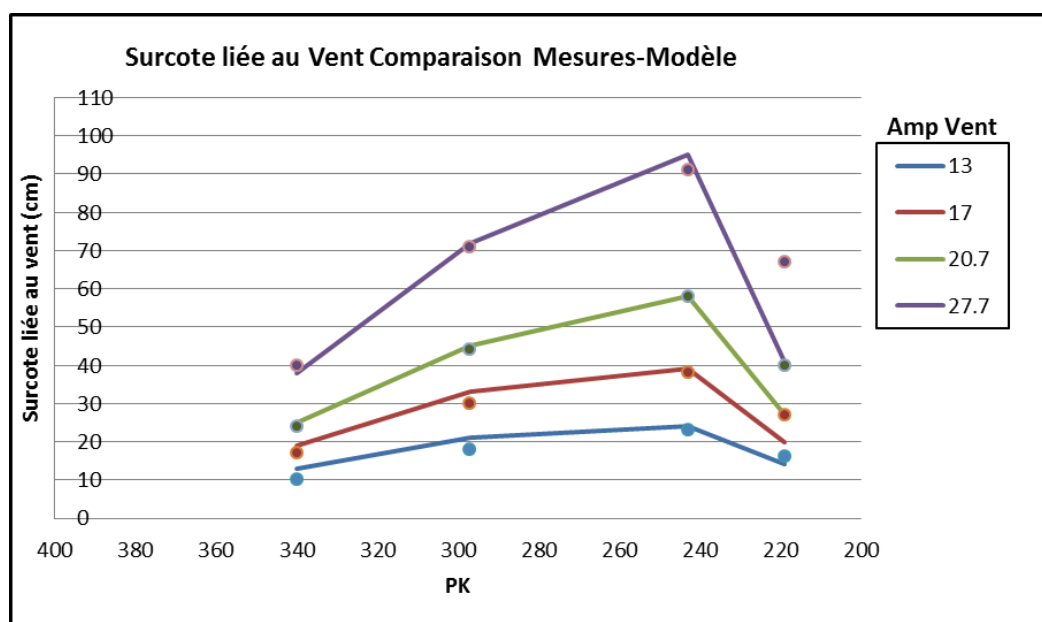
D'autre part, le résidu Res présente un écart moyen de 19 cm et suit une loi normale permettant de définir sa probabilité.

### 4.2.9. Éléments complémentaires sur l'influence du vent

La modélisation a permis d'affiner la connaissance de l'action du vent sur les niveaux observés à travers son action sur le gonflement de l'estuaire. La comparaison globale entre les résultats issus de la modélisation et ceux issus de l'analyse des données est présentée sous forme de tableau Tabl. 58 - et sous forme graphique (Fig. 88). L'accord global est assez remarquable et valide de manière conjointe l'analyse des vents sur ces stations et la qualité du modèle en lit mineur.

**Tabl. 58 - Comparaison des surcotes liées au vent évaluées par l'analyse des mesures et par modélisation**

Vent au Cap de la Hève (m/s)	TANCARVILLE		HEURTEAUVILLE		ROUEN		ELBEUF	
	Surcote au obtenue analyse mesures (cm)	liée vent obtenue par modèle (cm)	Surcote au obtenue analyse mesures (cm)	liée vent obtenue par modèle (cm)	Surcote au obtenue analyse mesures (cm)	liée vent obtenue par modèle (cm)	Surcote au obtenue analyse mesures (cm)	liée vent obtenue par modèle (cm)
13	13	10	21	18	24	23	14	16
17	19	17	33	30	39	38	20	27
20.7	25	24	45	44	58	58	27	40
27.7	38	40	72	71	95	91	41	67



**Fig. 88. Influence de l'intensité du vent sur la ligne d'eau – comparaison mesure/modèle**

Il faut cependant pointer deux cas particuliers :

- La modélisation est clairement en désaccord avec la valeur qualifiée à partir des mesures sur Elbeuf (PK 220). Rappelons que l'incertitude sur la loi proposée à partir des données est très forte du fait de l'indisponibilité de la donnée extrême en vent de février 1990.



**Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque  
inondation dans l'estuaire de la Seine**

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

- 
- L'accord entre la modélisation et l'analyse des données à Tancarville (PK 240) est peut être fortuite. En effet la modélisation ne prend en compte que l'effet du gonflement lié au vent de l'estuaire. La mesure devrait prendre en compte en partie la surcote maritime observée ce jour de 58 cm au Havre.

En synthèse, les résultats de la modélisation nous apportent un certain nombre d'éléments :

- Le modèle confirme la forte influence du vent sur le secteur de l'estuaire de la Seine ;
- La direction du vent joue un rôle important et montre que la détermination des surcotes par les mesures tous secteurs confondus est limitée ;
- Le modèle confirme que les vents de secteur Est peuvent provoquer des décotes dans l'estuaire avec -35 cm à Rouen pour un vent fort de cap 160 N ;
- Les courbes présentent des formes légèrement sinusoïdales dues à l'angle fait par l'orientation du vent et l'axe de la Seine dans les boucles. Ces effets limitent partiellement l'influence du vent jusqu'à Rouen qui pourrait donc être plus importante sans les boucles ;
- Ce dernier point se traduit d'autre part par le fait que le vent de direction 300°N présente l'impact sur la ligne d'eau le plus fort entre Rouen et Poses alors que le vent dominant sur le reste de l'estuaire est la direction 260°N. Ce point est à mettre en relation avec le fait que les vents dominants à ce jour proviennent d'une direction 220°N. Une tempête venant un peu plus du secteur nord est-elle possible ? Si oui, elle pourrait conduire à des surcotes importantes non encore observées à ce jour.

### 4.3. SYNTHÈSE SUR LES LOIS DE COMPORTEMENT

Les lois de comportement établies dans les chapitres précédents et utilisées dans la suite de l'étude sont rappelées pour chaque site ci-après. Rappelons que :

- M est la composante de la marée issue de l'analyse du signal des niveaux ;
- Pa est la Pression Atmosphérique au Havre ;
- Q, le débit à Poses ;
- V, le Vent ; Va, l'amplitude du vent au Cap de la Hève (réduite à 10 m).

#### 4.3.1. Le Havre

Au Havre, l'utilisation de la formule  $Z = Z_M + Z_{Pa} + Z_Q + Z_V + Res$  ne permet pas de prendre en compte les phénomènes se produisant à l'échelle du secteur « Manche - Baie de Seine » ; les résultats de l'étude SHOM seront donc utilisés pour obtenir les surcotes ainsi que leurs périodes de retour.

#### 4.3.2. Rouen

$$Z = Z_{M,Q} + Z_{Pa} + Z_V + Res$$

Avec :

$Z_{M,Q}$  fourni par une analyse des valeurs moyennes par tronçon

$$Z_{Pa} = -0,8547 \delta Pa + 8,71854$$

$$Z_V = 0.118 V_a^2 + 0.34 V_a + 0$$

A Rouen, la loi de comportement liée au vent issue de la modélisation est très proche de celle obtenue à partir des mesures. Ainsi, la loi obtenue avec la mesure est conservée pour la suite de l'étude. Il en est de même à Heurteville.

### 4.3.3. Tancarville

A Tancarville, la loi obtenue en corrélant la surcote à Tancarville à celle du Havre (Balise A) sera privilégiée ultérieurement pour construire les lignes d'eaux statistiques pour des niveaux de fréquence centennale (chapitre 5.2.3).

$$Z = Z_{M,Q} + Z_{maritime} + Z_v^{estuarien}$$

Avec :

$Z_{M,Q}$  fourni par une analyse des valeurs moyennes par tronçon

$$Z_{maritime} = 1.05Z_{maritime}^{Havre} + 12$$

$$Z_v^{Estuarien} = 0.026 V_a^2 + 0.654V_a + 0$$

### 4.3.4. Heurteauville

$$Z = Z_{M,Q} + Z_{Pa} + Z_V + Res$$

Avec :

$Z_{M,Q}$  fourni par une analyse des valeurs moyennes par tronçon

$$Z_{Pa} = -1.06\delta Pa + 5,028$$

$$Z_V = 0.062 V_a^2 + 0.9V_a + 0$$

### 4.3.5. Elbeuf

$$Z = Z_{M,Q} + Z_{Pa} + Z_V + Res$$

Avec :

$Z_{M,Q}$  fourni par une analyse des valeurs moyennes par tronçon

$$Z_{Pa} = -0.8513\delta Pa + 8.2519$$

$$Z_V = 0.08 V_a^2 + 0.20V_a + 0 \text{ telle que décrite par la modélisation}$$

## 5. OCCURRENCE DES COMBINAISONS CRITIQUES D'ÉVÉNEMENTS

L'analyse des données complétées par la modélisation a permis d'établir les liens directs entre les niveaux observés et les facteurs primaires. Ce chapitre a pour objet d'établir les combinaisons d'événements qui relient un niveau observé aux périodes de retour de ces facteurs, puis de déterminer les scénarios possibles conduisant aux lignes d'eau de différentes périodes de retour (10ans, 100ans, 500ans).

### 5.1. SYNTHÈSE DES RESULTATS OBTENUS

#### 5.1.1. Facteurs primaires

Les facteurs primaires sont synthétisés en fonction de leur période de retour sur le tableau suivant (Tabl. 59 - ).

**Tabl. 59 - Période de retour des niveaux et surcotes au Havre (décrit par le SHOM) et des facteurs primaires Q, Pa et Vent**

P	Z SHOM	S SHOM	Q Poses	PA- (mb)	V (m/s)
1	864*	75*	1450	34,22	11,9
2	872*	84*	1640	36,47	14,0
5	883*	95*	2105	43,43	16,7
10	888	104	2230	48,03	18,8
20	903	112	2350	52,45	20,8
50	912	125	2510	58,17	23,6
100	916	132	2625	62,45	25,6
200	927*	141*	2744	66,72	27,6
500	937*	153*	2900	72,36	30,4
1000	946*	161*	3015	76,61	32,4

Ces facteurs sont déterminés de la manière suivante :

- La cote Z et la surcote S maritime au Havre telle que définie par le SHOM (Chapitre 4.1.3), les données marquées d'une (\*) ayant été extrapolées par la loi de Gumbel ;
- Le débit à Poses établi par l'étude hydrologique (chapitre 4.1.1.1) ;
- La loi de Gumbel associée aux mesures de la variation de la pression (valeurs négatives, chapitre 4.1.4) ;
- La loi de Gumbel associée aux mesures de la variation de l'intensité du vent (chapitre 4.1.5.4).

### 5.1.2. Statistiques

Les analyses effectuées au cours du chapitre 4 conduisent à établir pour chaque site (Balise A, Tancarville, Heurteauville, Rouen, Elbeuf) des statistiques pour chaque paramètre. Ces dernières sont établies par une loi de Gumbel sur la base des signaux individuels de Z, Z(M,Q), S(M,Q) et Res. Pour S(PA) et S(V), elles sont établies à partir des lois de probabilité de PA et V (Tabl. 59 - ) et des fonctions de corrélation (loi de comportement) établies pour chaque site. A la Balise A, les résultats issues de l'étude SHOM sont repris.

Ces statistiques sont présentées dans les tableaux ci-après.

#### 5.1.2.1. SECTEUR LE HAVRE (BALISE A)

**Tabl. 60 - Balise A – Statistiques (basées sur étude SHOM)**

P(an)	Z (m CMH)	S(M,Q)
1	864	75
2	872	84
5	883	95
10	888	104
20	903	112
50	912	125
100	916	132
200	927	141
500	937	153
1000	946	161

#### 5.1.2.2. SECTEUR TANCARVILLE

**Tabl. 61 - Tancarville – Statistiques (en corrélant la surcote à Tancarville avec celle à la Balise A)**

P(an)	Z(m CMH)	Z(M,Q)	S(mar)	S(V)	Res
1	886	848	86	8	45
2	893	850	91	10	51
5	917	855	108	17	68
10	933	859	119	21	79
20	948	862	129	25	90
50	967	866	143	30	105
100	982	870	153	34	115
200	996	873	163	38	126
500	1015	877	176	44	140
1000	1030	880	187	48	150

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

### 5.1.2.3. SECTEUR HEURTEAUVILLE

**Tabl. 62 - Heurteauville – Statistiques**

P(an)	Z(m CMH)	Z(M,Q)	S(M,Q)	S(Pa)	S(V)	Res
1	890	865	90	41	12	62
2	896	868	96	44	16	64
5	916	876	113	51	30	72
10	929	881	125	56	39	77
20	942	886	136	61	46	81
50	958	893	150	67	56	87
100	970	898	160	71	64	91
200	982	903	171	76	72	95
500	998	909	185	82	85	100
1000	1010	914	196	86	94	108

### 5.1.2.4. SECTEUR ROUEN

**Tabl. 63 - Rouen – Statistiques**

P(an)	Z(m CMH)	Z(M,Q)	S(M,Q)	S(Pa)	S(V)	Res
1	948	939	83	38	6	54
2	953	941	87	40	12	56
5	969	949	100	46	32	62
10	979	953	109	50	46	66
20	989	958	117	54	56	70
50	1002	964	128	58	70	74
100	1012	968	136	62	82	78
200	1021	973	144	66	95	81
500	1034	979	155	71	114	85
1000	1044	983	163	74	129	91

## 5.1.2.5. SECTEUR ELBEUF

**Tabl. 64 - Elbeuf – Statistiques**

P(an)	Z(m CMH)	Z(M,Q)	S(M,Q)	SPa)	S(V)	Res
1	1018	975	71	37	4	64
2	1028	979	76	39	8	66
5	1060	992	90	45	22	73
10	1081	1001	99	49	32	78
20	1102	1018	108	53	39	83
50	1128	1021	120	58	49	89
100	1148	1029	128	61	58	94
200	1167	1038	137	65	67	98
500	1193	1049	149	70	80	103
1000	1213	1057	157	73	91	107

### 5.1.3. Lignes d'eau

Les valeurs reportées sur les tableaux précédents sont représentées sous forme graphique pour recombinaison des lignes d'eau des événements décennaux, centennaux et cinq-centennaux sur les graphes suivants. Pour mémoire, on reporte en miniature sur ces graphes les lignes d'eau historiques observées (Fig. 12).

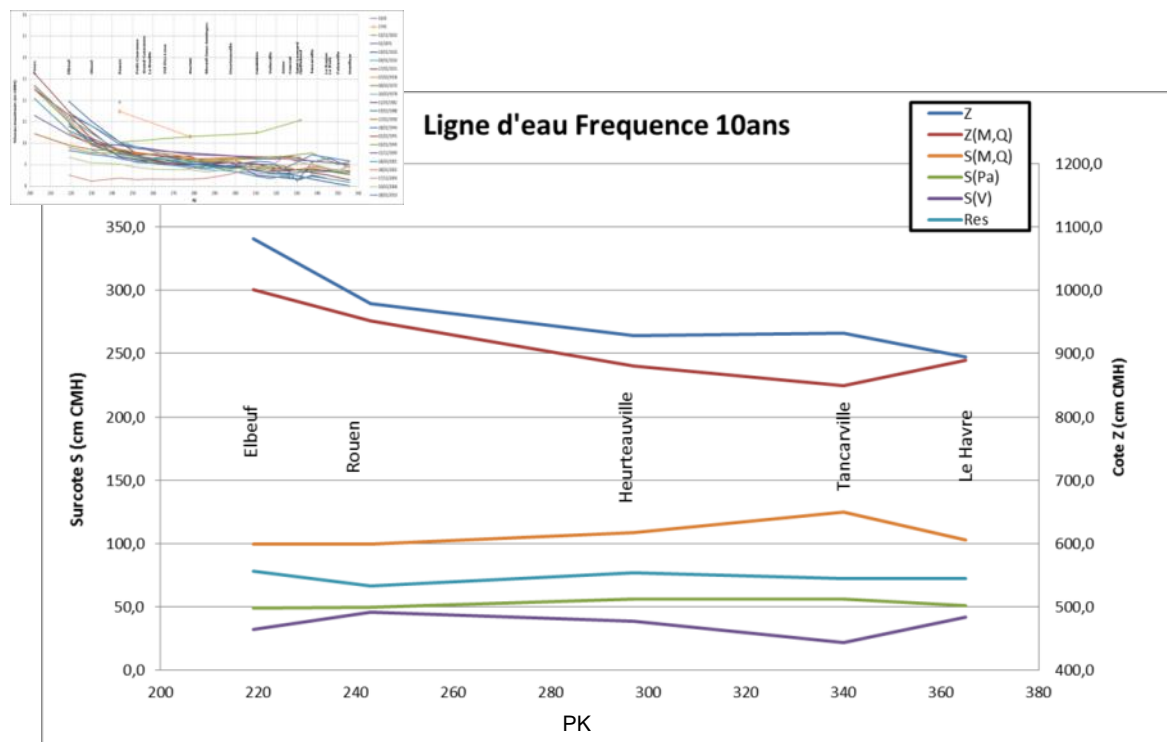
#### 5.1.3.1. LIGNES D'EAU DECENNALES

Les lignes d'eau décennales sont présentées sur la Fig. 89. On note une surcote importante à Tancarville qui avait été identifiée sur les observations.

D'autre part, la surcote liée au vent à Tancarville semble présenter une sous-estimation alors qu'à l'opposé, on pourrait s'attendre à un pic. Ceci traduit le fait que l'analyse n'a pas permis d'identifier le cumul de l'influence de la surcote maritime liée aux effets du vent en baie de Seine et les effets propres du gonflement de l'estuaire.

La surcote liée à la pression atmosphérique est bien homogène sur l'ensemble du secteur ce qui est cohérent avec l'étendue géographique des systèmes dépressionnaires.

Le résidu présente lui aussi une caractéristique assez homogène le long de l'estuaire.



**Fig. 89. Lignes d'eau décennales le long de l'estuaire des niveaux et surcotes liés aux facteurs primaires et résidu**

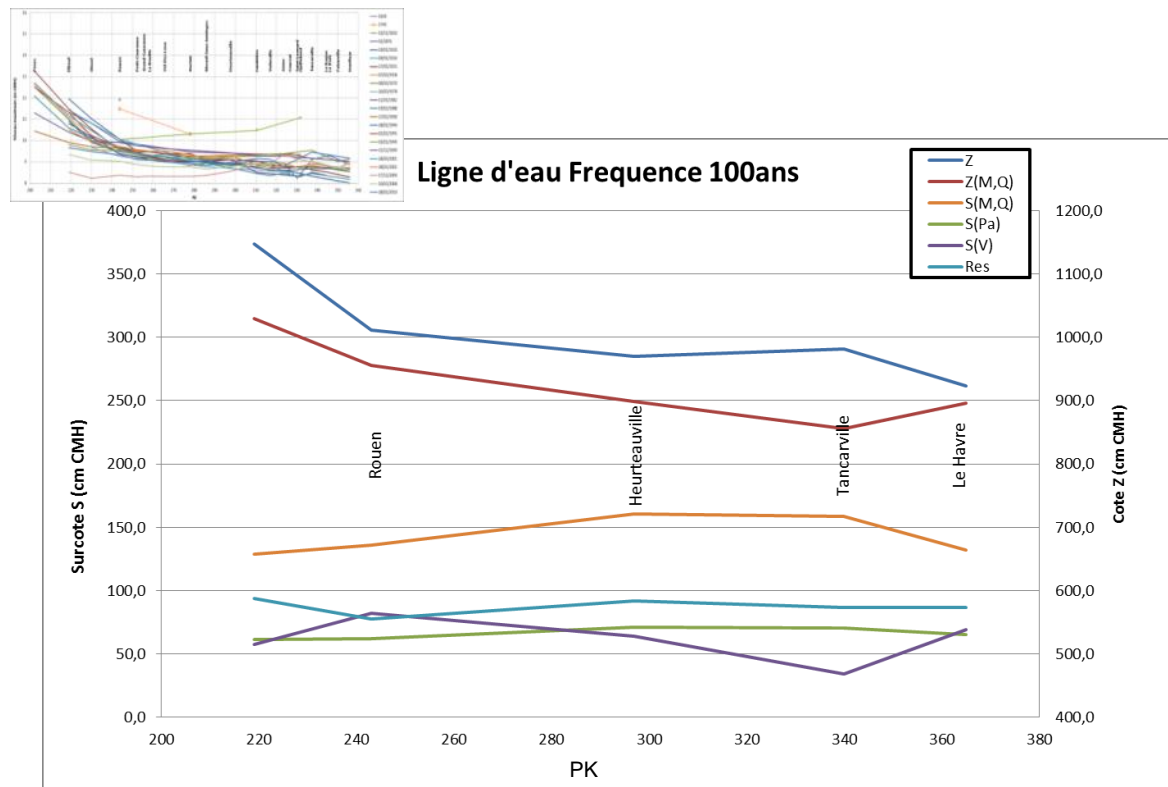


### 5.1.3.2. LIGNES D'EAU CENTENNALES

Les lignes d'eau centennales sont présentées sur la Fig. 90. Une surcote importante s'étend de Tancarville à Heurteauville. Ceci peut être lié au fait que l'influence maritime des surcotes extrêmes est ressentie en centennale jusqu'à Heurteauville alors qu'en décennale, cette influence s'arrêterait à Tancarville.

Comme pour la ligne d'eau décennale, la surcote liée au vent à Tancarville semble présenter une sous-estimation alors qu'on pourrait s'attendre à un pic.

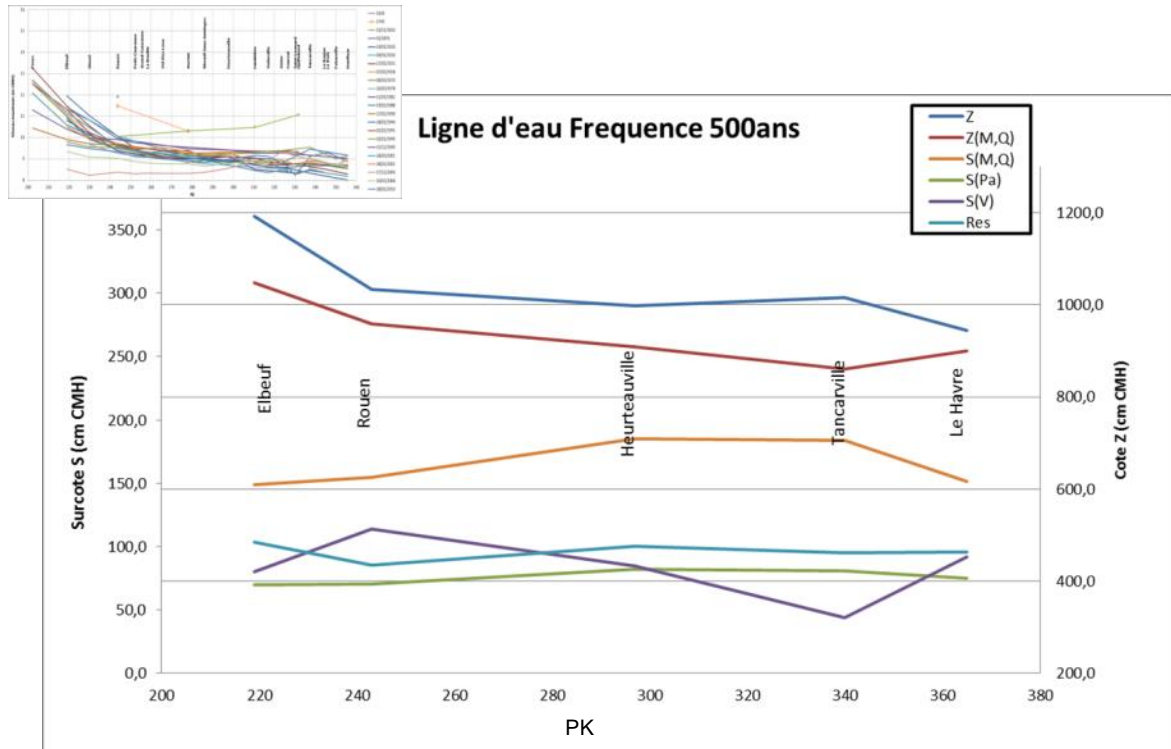
La surcote liée à la pression atmosphérique est là aussi bien homogène sur l'ensemble du secteur tout comme le résidu.



**Fig. 90. Lignes d'eau centennale le long de l'estuaire des niveaux et surcotes liés aux facteurs primaires et résidu.**

### 5.1.3.3. LIGNES D'EAU CINQ-CENTENNALES

Les lignes d'eau cinq-centennales sont présentées sur la Fig. 91. L'ensemble des observations commentées sur les lignes d'eaux centennales sont transposables pour celles-ci.



**Fig. 91. Lignes d'eau cinq-centennales le long de l'estuaire des niveaux et surcotes liés aux facteurs primaires et résidu**

## 5.2. COMBINAISON D'ÉVÉNEMENTS

### 5.2.1. Principe méthodologique de la combinaison d'événements appliqué à la surcote $S_{M,Q}$

La surcote observée est induite par les effets des facteurs primaires que sont la pression atmosphérique et le vent ; il reste un résidu dont les origines sont indéterminées. Considérant ces trois facteurs indépendants, la probabilité de la surcote est égale au produit des probabilités :

$$S_{M,Q}(P100)=S_{Pa}(P10)+S_V(P10)+Res(P1)$$

ou

$$S_{M,Q}(P100)=S_{Pa}(P2)+S_V(P5)+Res(P10) \dots$$

Au total 24 combinaisons sont possibles pour obtenir une surcote centennale avec les probabilités de référence 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 ans (Tabl. 65 - ).

**Tabl. 65 - Liste des 24 combinaisons de probabilité des facteurs primaires et résidus conduisant à une surcote centennale**

P(Pa)	P(V) et P(Res)						
	100-1	1-100	2-50	50-2	5-20	20-5	10-10
1							
2	50-1	1-50	5-10	10-5			
5	20-1	1-20	10-2	2-10			
10	10 -1	1-10	5-2	2-5			
20	1-5	5-1					
50	1-2	2-1					
100	1-1						

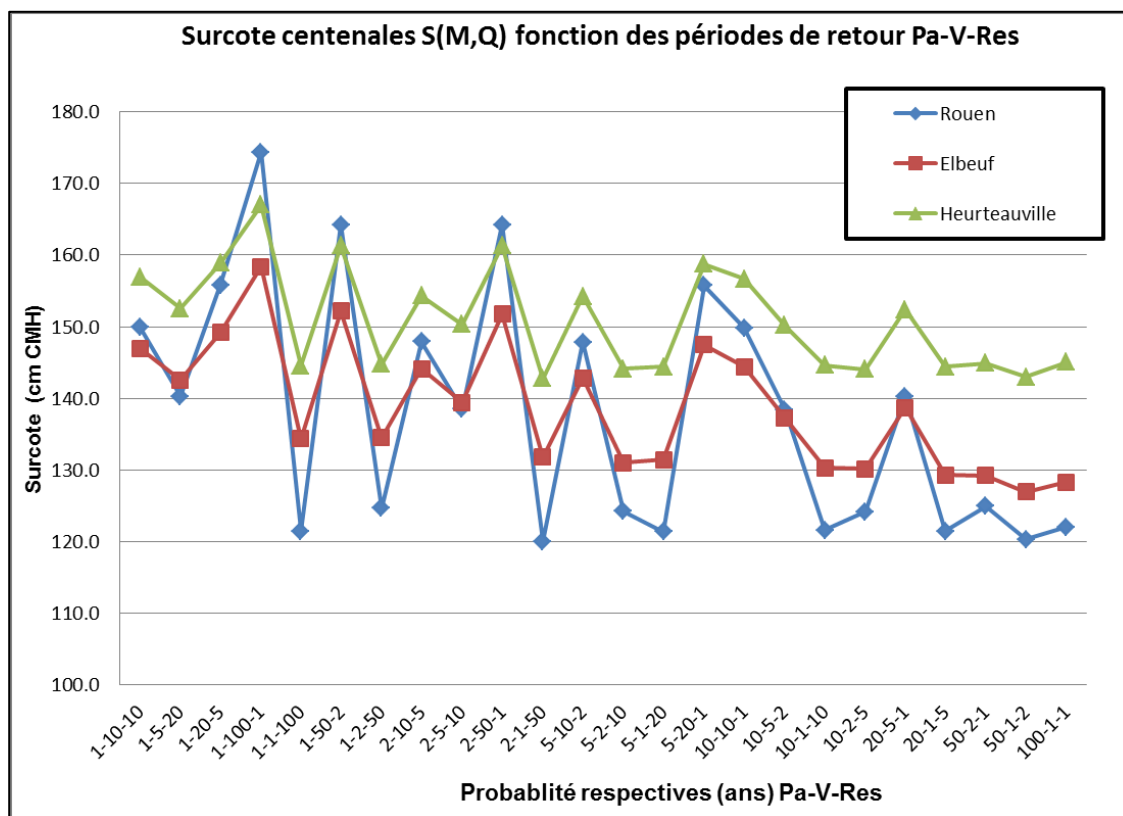
Chaque combinaison est calculée à partir des tableaux précédents. Le tableau suivant (Tabl. 67 - ) présente les valeurs obtenues pour les 5 stations.

**Tabl. 66 - Combinaisons des probabilités S(Pa), S(V) et RES conduisant à une surcote centennale**

	Observation	Moyenne	Min	Max
Heurteauville	160,4	150,9	142,8	167,0
Rouen	135,9	138,1	120,1	174,3
Elbeuf	128,5	138,9	127,0	158,4

Ces valeurs sont synthétisées sous forme de graphique sur la Fig. 92. L'ensemble des combinaisons est reportée en abscisse et chaque ligne décrit une des 5 stations.

On constate clairement l'incohérence de la station de Tancarville par rapport aux autres sites. Ceci est dû à la forte incertitude de la relation liée au vent.



**Fig. 92. Ensemble des combinaisons conduisant à une surcote centennale pour les stations Heurteauville, Rouen et Elbeuf.**

3 types de conditions ressortent :

- La condition dominante est obtenue en favorisant l'action du vent ( $P(V)=100$ ,  $P(PA)=1$ ,  $P(Res)=1$ ) ;
- Un autre ensemble de conditions dominantes est obtenu en équilibrant l'action du vent avec la pression atmosphérique ou le résidu ( $P(V)=10$ ,  $P(PA)=10$ ,  $P(Res)=1$  ou  $P(V)=10$ ,  $P(PA)=1$ ,  $P(Res)=10$ ) ;
- Un dernier ensemble de conditions dominantes est obtenu en équilibrant l'action des 3 facteurs ( $P(V)=2$ ,  $P(PA)=5$ ,  $P(Res)=10$  ou  $P(V)=5$ ,  $P(PA)=10$ ,  $P(Res)=2$ ).

## 5.2.2. Principe méthodologique de la combinaison d'événements appliqué aux niveaux Z et Z(M,Q)

La combinaison Marée/Débit non linéaire rend difficile la même approche à 2 dimensions que celle employée précédemment pour la surcote. Le tableau suivant reporte la probabilité pour Rouen de chaque cellule. La longueur de l'enregistrement est de 27,76 ans.

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

**Tabl. 67 - Rouen – probabilité d'occurrence d'événements fonction du débit de la seine et des niveaux de la marée au Havre (unités = années)**

Q (m3/s)	15-150	150-300	300-450	450-600	600-750	750-900	900-1050	1050-1200	1200-1350	1350-1500	1500-1650	1650-1800	1800-1950	1950-2281
Z(cm)														
624-640		2,3	0,7	0,8	1,0	1,5	2,8	1,7	2,1	27,8	6,9	2,1	9,3	
640-660	2,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	0,8	0,8	2,0	2,0	4,6	13,9	5,6
660-680	1,0	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,5	0,6	0,7	1,0	1,0	3,5	13,9	3,1
680-700	0,8	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,5	0,6	0,5	1,7	2,0	2,5	5,6	2,1
700-720	0,8	0,0	0,1	0,1	0,2	0,4	0,3	0,6	0,5	1,5	2,5	2,1	5,6	2,3
720-740	0,8	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,8	0,5	1,3	3,1	2,8	3,5	2,8
740-760	0,7	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,9	0,5	1,2	2,5	2,5	4,6	3,1
760-780	0,6	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,6	0,3	0,8	1,5	3,1	1,6	3,1
780-800	0,9	0,0	0,0	0,1	0,2	0,2	0,3	0,6	0,3	0,9	1,1	2,5	2,1	2,0
800-820	0,7	0,0	0,1	0,1	0,3	0,3	0,4	0,8	0,6	1,4	0,9	1,7	6,9	2,3
820-840	2,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,9	1,0	1,2	1,9	27,8	6,9	4,6
840-860	3,5	0,1	0,2	0,3	0,6	0,7	0,7	2,1	1,4	1,9	9,3	13,9	13,9	13,9
860-880	13,9	0,3	0,4	0,8	4,6	3,5	2,8	3,5	9,3	27,8		13,9		
880-894	13,9	2,3	3,1	13,9										

Il ressort clairement que nous ne disposons pas d'assez d'événements pour définir une loi de probabilité globale de l'occurrence des événements croisés entre la fréquence des débits à Poses et la fréquence des marées.

Afin de pallier ce défaut, la méthode préconisée est une méthode « inverse » qui consiste à rechercher l'événement compatible de  $Z_{M,Q}$  pour une occurrence donnée : connaissant l'occurrence recherchée Z et se donnant l'occurrence de surcote  $S_{M,Q}$ , on en déduit les valeurs de Z(M,Q) de l'occurrence restante.

Ainsi, le report des fréquences d'occurrence des niveaux observés à Rouen (issu du tableau Tabl. 34 - selon un code couleur est présenté sur le tableau Tabl. 68 - ). Ce tableau traduit les éléments suivants :

- Un débit de fréquence 20 ans se produisant au moment d'un coefficient de marée 80 (vive eau moyenne) ou inférieur conduit à des niveaux à Rouen qui seront inférieurs à un niveau de probabilité un an.
- Une marée exceptionnelle (coefficient 115) conduit à des niveaux inférieurs à ceux de fréquence 2 ans si elle arrive au moment d'une crue annuelle.
- La concomitance d'une marée exceptionnelle (coefficient 115) et d'une crue de fréquence 20 ans ne conduit pas à des niveaux plus rares que la fréquence de la crue elle-même. Ceci signifie que d'autres combinaisons débit-marée permettent d'obtenir le même type de niveau.

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

**Tabl. 68 - Rouen – fréquence des niveaux observés selon le débit et le coefficient des marées (certaines valeurs extrêmes ont été interpolées du Tabl. 34 - )**

		3m					6m					1	2	3	5	10	P(Q)	
		15	82.5	225	375	525	675	825	975	1125	1275	1425	1575	1725	1875	2116	2281	Q Poses
25	623	634	636	646	657	670	683	698	704	712	720	736	747	753	766	780	793	
35	632	639	640	650	661	673	686	700	706	714	721	736	747	753	765	778	791	
45	650	652	653	664	676	690	704	719	727	736	744	760	771	779	792	807	821	
50	670	668	669	680	693	706	721	735	744	753	761	778	788	797	809	824	839	
55	690	683	685	696	709	723	738	753	763	772	781	797	807	818	829	844	861	1
60	710	698	699	711	724	738	753	768	778	788	796	812	822	833	844	859	876	2
65	730	710	712	724	737	752	769	784	795	805	814	831	840	853	863	880	898	5
70	750	725	727	738	752	767	784	798	810	820	828	845	854	868	877	893	912	10
80	770	738	740	752	767	782	800	815	827	839	847	864	873	889	897	914	935	20
90	790	753	754	767	782	797	815	830	843	854	862	879	887	904	912	929	950	50
100	810	767	769	782	797	812	831	846	860	871	879	896	904	922	929	946	968	100
110	830	780	782	795	810	826	845	860	875	886	894	912	919	938	944	962	985	200
115	850	798	799	811	826	841	860	874	888	900	906	923	929	949	953	970	993	500
120	894	827	828	842	859	875	896	911	928	941	948	966	973	996	1000	1018	1044	1000
Coef	Z																	
Marée	Marée																	

A partir de ce tableau on peut en déduire les valeurs de  $Z(M,Q)$ .

Exemple :

A Rouen, la probabilité centennale de la cote est  $Z(P100) = 1012$  cm CMH. La probabilité centennale de la surcote est  $S_{M,Q}(P100) = 135,9$  cm CMH, on en déduit que le niveau  $Z_{M,Q}$  de probabilité annuelle est de 1012-135,9 soit 876,1 cm CMH. Ce niveau peut être obtenu par différentes combinaisons : une marée de coefficient 120 et un débit de 525 m<sup>3</sup>/s ou bien par une marée de coefficient 60 associée à un débit de fréquence 10 ans, ...

Ou encore :

La probabilité centennale de la cote est  $Z(P100) = 1012$  cm CMH. La probabilité décennale de la surcote est  $S_{M,Q}(P10) = 108,8$  cm CMH, on en déduit que le niveau  $Z_{M,Q}$  de probabilité décennale est de 1012-108,8 soit 903,2 cm CMH.

### 5.2.3. Reconstruction de la ligne d'eau de fréquence centennale

A partir des analyses précédentes, on reconstruit les lignes d'eaux statistiques pour des niveaux de fréquence centennale en considérant :

- La combinaison des facteurs primaires et du résidu qui conduit à une surcote de fréquence donnée  $P_s$  ;
- Le niveau  $Z(M,Q)$  observé correspondant à la fréquence complémentaires  $P100/P_s$ .

Par exemple, si on considère  $P_s=P100$ , c'est-à-dire les surcotes de fréquence centennale d'une part, il existe 24 combinaisons possibles des facteurs primaires (PA et V) et du résidu, d'autre part, le niveau  $Z(M,Q)$  complémentaire est celui de fréquence annuel obtenu par  $Z(P100)-S(P100)$

Cette méthode permet de reconstruire les lignes d'eau centennales en fonction de la surcote. On présente sur la Fig. 93 et la Fig. 94 ces lignes d'eau de la manière suivante :

- La valeur moyenne des combinaisons des facteurs primaires et du résidu est tracée en rouge ;

## Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine

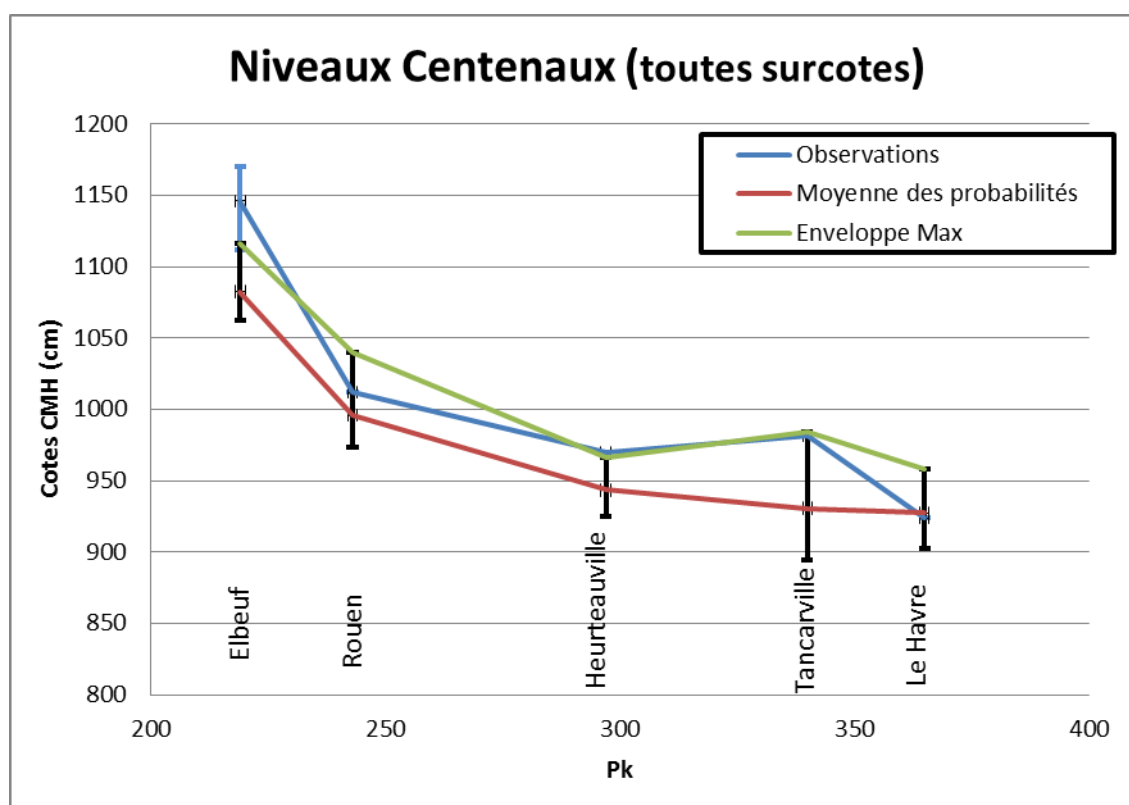
Objectif A

RAPPORT FINAL V2

- La barre d'encadrement de cette courbe moyenne correspond à l'enveloppe de toutes les combinaisons possibles ;
- L'enveloppe maximale de toutes les combinaisons possibles est tracée en vert ;
- La courbe des observations est tracée en bleu.

La ligne d'eau moyenne et les enveloppes pour toutes les surcotes possibles de probabilité P100, P50, P20, P10, P5, P2, P1 sont représentées sur la Fig. 93. Cette figure montre que les observations centennales estimées par loi de Gumbel sont bien encadrées par l'enveloppe des statistiques élaborées sauf sur Elbeuf. On note que :

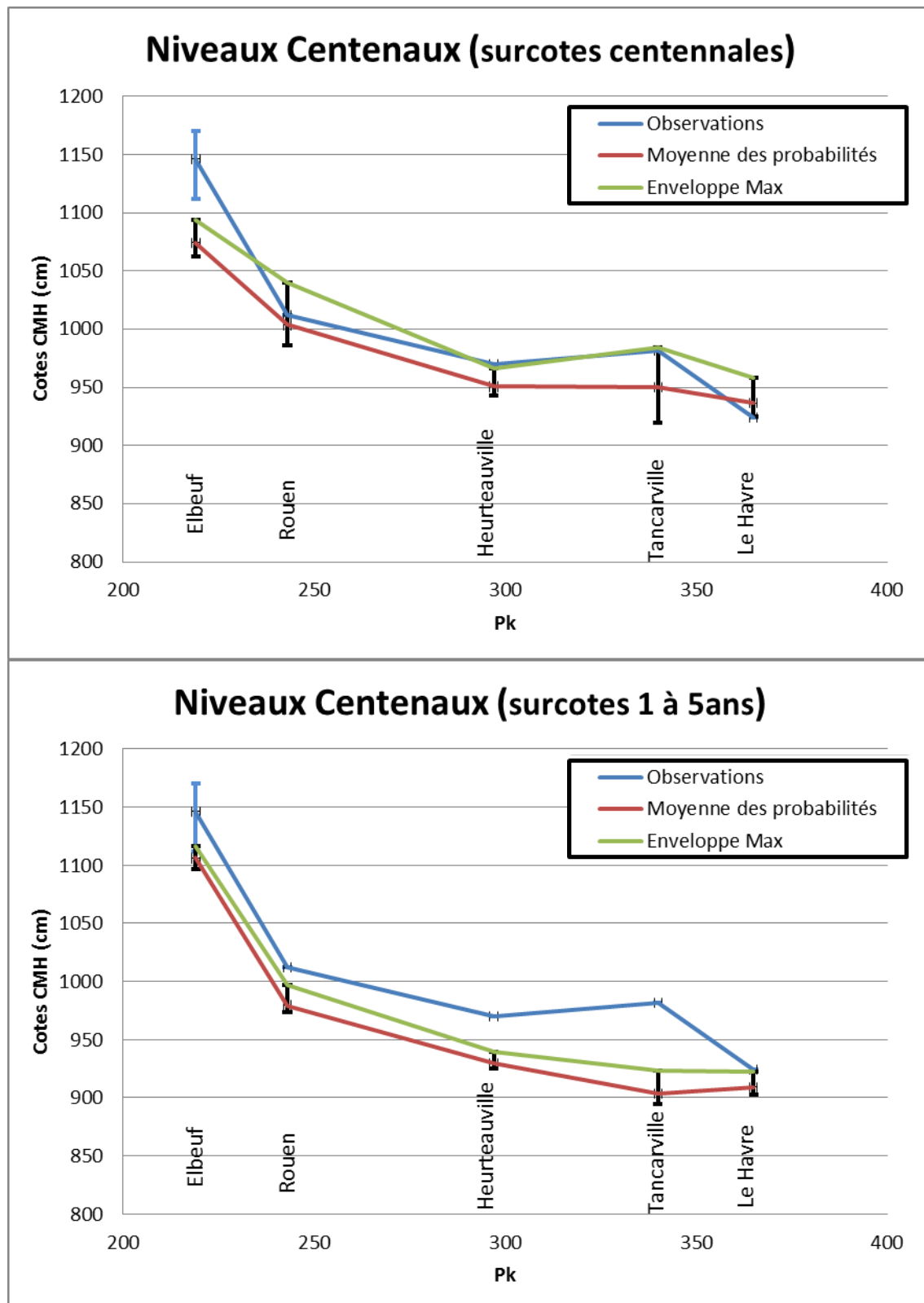
- Les surcotes observées à Heurteauville et Tancarville sont situées à la limite des valeurs hautes des statistiques. Cela peut signifier que les estimations des niveaux centennaux sont potentiellement un peu surestimées ;
- Les surcotes observées, estimées par loi de Gumbel à Elbeuf sont supérieures à la limite haute des statistiques. Il faut cependant rappeler que cette loi de Gumbel était la plus incertaine de toutes (voir chapitre 4.2.8.1). Nous avons reporté sur la ligne bleue l'incertitude proposée sur la loi de Gumbel. Il apparaît que la valeur minimum de l'estimation centennale des observations rentre dans l'enveloppe statistique proposée. Cela signifie probablement que la loi de Gumbel proposée pour Elbeuf est surestimée.



**Fig. 93. Lignes d'eau centennales pour l'ensemble des surcotes possibles**

La ligne d'eau moyenne et les enveloppes pour la surcote centennale seule sont représentées sur la Fig. 94 (haut) ; Il s'agit des événements statistiques à dominante maritime.

La ligne d'eau moyenne et les enveloppes pour toutes les surcotes possibles de probabilité P5, P2, P1 apparaissent sur la Fig. 94 (bas). Il s'agit donc des événements à dominante fluviale.



**Fig. 94.** Lignes d'eau centennales pour les surcotes centennales (en haut) et les surcotes faibles ≤5ans (en bas)



Les enseignements suivants peuvent être apportés :

- Les niveaux maximaux à Elbeuf sont atteints par les surcotes les plus faibles, donc les débits les plus forts. Elbeuf est donc dans un régime fluvial dominant ;
- Sur le Havre, toutes les combinaisons surcotes/marées conduisent sensiblement aux mêmes types de niveaux observés en centennal, même si les surcotes centennales fournissent les niveaux les plus forts ;
- Sur Tancarville et Heurteville, les niveaux centennaux sont clairement atteints par les surcotes centennales ;
- Sur Rouen, les niveaux centennaux sont atteints par les surcotes centennales mais l'écart avec les lignes d'eau centennales des surcotes  $\leq 5$  ans est faible. Cela signifie que la limite de l'influence fluviale dominante se situe à l'amont proche de Rouen.

En synthèse et tenant compte des incertitudes sur ces lignes d'eau, nous pouvons considérer 4 zones homogènes décrivant les lignes d'eau de l'estuaire :

- Le secteur du Havre : de nombreuses combinaisons surcotes-marée peuvent conduire à des niveaux extrêmes. On dénomme ce secteur « Maritime » ;
- Le secteur Tancarville-Heurteville est dominé par les surcotes centennales. On dénomme ce secteur « Maritime Estuarien » ;
- Le secteur de Rouen est dominé par les surcotes centennales mais il n'est pas exclu que des événements de type crues extrêmes soient dominants sur ce secteur notamment pour les fréquences élevées de type 500 et 1000 ans. On dénomme ce secteur « Fluvio-Maritime » ;
- Le secteur amont de Rouen-Poses est dominé par les événements fluviaux. On dénomme ce secteur « Fluvial ».

### 5.3. PROPOSITION DE SCENARIOS POUR UNE LIGNE D'EAU CENTENNALE

#### 5.3.1. Scénarios « en conditions actuelles » (SCA)

L'objectif B a pour objet de proposer quelques scénarios combinant les facteurs primaires et dont l'enveloppe serait représentative de la ligne d'eau centennale sur l'ensemble de l'estuaire.

En fonction des analyses et observations réalisées dans les chapitres précédents, les 4 scénarios suivants sont proposés :

- **SCA1** : scénario de marée forte (coefficient  $> 100$ ) et de surcote décennale – scénario de type maritime (période de retour 100ans) – Secteur d'influence : Le Havre.
- **SCA2** : scénario de marée moyenne type coefficient 70, de débit annuel et de surcote centennale - scénario de type « fluvio maritime » ou « maritime estuarien » (période de retour 100 ans) – Secteur d'influence : Le Havre à Rouen.
- **SCA3** : scénario de marée moyenne haute type coefficient 85, de débit décennal et de surcote décennale - scénario de type « fluvio maritime » ou « maritime estuarien » (période de retour 100 ans) – Secteur d'influence : Le Havre à Rouen.
- **SCA4** : scénario de marée moyenne, de débit centennal et de surcote annuelle - scénario de type fluvial (période de retour 100 ans) – Secteur d'influence : Elbeuf.

- **SCA5** : scénario de marée forte (coefficient >100), de débit centennal et de surcote centennale – Scénario extrême de période de retour 500 ans.

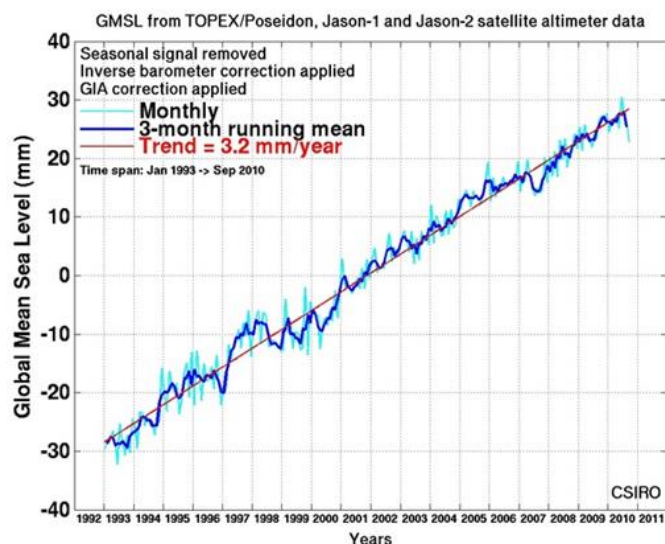
### 5.3.2. Scénarios « Impact changement climatique » ou « élévation du niveau marin » (SCC)

De nombreuses études ont été et sont encore menées pour estimer les conséquences du changement climatique à un niveau national et régional. Citons en particulier la circulaire du 27 juillet 2011, les études MEDCIE (Mission d'études et de développement des coopérations interrégionales et européennes) et l'étude sur le changement climatique en Haute-Normandie de Météo France (juin 2011).

On retiendra à ce jour les éléments suivants :

#### Niveau de la mer

« L'hypothèse retenue est celle d'une augmentation du niveau marin égale à 60 cm selon le décret de 2011 à l'horizon 2100 » (optimiste 40cm, pessimiste 1m établi sur la base de l'hypothèse « pessimiste » de l'ONERC).



**Fig. 95. Evolution du niveau moyen (1992-2001)**

#### Fréquence des tempêtes :

Il est reconnu par le dernier GIEC que la fréquence des tempêtes va augmenter mais pas leur intensité. Cela signifie que la loi de probabilité de PA et V va augmenter mais pas la loi reliant les surcotes à PA et V. Aucune donnée quantitative à ce jour n'est cependant disponible.

**Pluie/débit** : Les conclusions du GIEC et des études de « downscaling » sur la France montrent toutes une augmentation des étiages en durée et donc en intensité, mais peu se prononcent clairement sur les pluies et les crues. Notons cependant l'étude MEDCIE pour la région Nord-Pas de Calais-Picardie qui annonce une augmentation de 5 à 15% des précipitations. L'étude Météo France sur la Haute-Normandie annonce, elle, une augmentation de la proportion de fortes pluies parmi l'ensemble des épisodes pluvieux sans fournir de données quantitatives.

**SAM1** : Suppression des systèmes de protection artificielle (murets, digues ...) – Scénario état naturel ;

**SAM2** : Protections prioritaires de toutes les zones à enjeux (mise hors d'eau, rehaussement des digues) ;

**SAM3** : Protections prioritaires de toutes les zones à enjeux (mise hors d'eau) et zone d'expansion des crues en plaines avec protections qui fonctionnent en décennale.

En termes de scénarios, 2 propositions peuvent être établies :

- **SCC1** : Une **augmentation du niveau moyen de la mer de 20cm**, pas de modification des autres facteurs primaires - Scénario de référence de l'élévation du niveau marin moyen.
- **SCC2** : Une **augmentation du niveau moyen de la mer de 60cm**, pas de modification des autres facteurs primaires – Scénario extrême.

Ces scénarios seraient menés sur la base d'un scénario en conditions actuelles, par exemple le scénario SCA2.

Scénario complémentaire :

- **SCC3** : Une **augmentation du niveau moyen de la mer de 60cm** associée à une modification des périodes de retour des autres facteurs primaires – Scénario extrême fluvio-maritime du changement climatique

Ce scénario serait mené sur la base d'un scénario en conditions actuelles, par exemple le scénario SCA3 ou SCA4.

### 5.3.3. Scénarios « Aménagements » (SAM)

Ces scénarios portent sur les différents aménagements de protection ou de réduction des inondations qui peuvent être envisagés à l'échelle du secteur d'étude. Nous nous appuyerons sur l'identification des enjeux et leur niveau de vulnérabilité pour définir précisément les principes de ces aménagements. A ce stade, seules les grandes lignes directrices sont décrites.

Les scénarios d'aménagements proposés sont les suivants :

- **SAM1** : Suppression des systèmes de protection artificiel (muret, digues ...) – scénario état naturel ;
- **SAM2** : Protections prioritaires de toutes les zones à enjeux (mise hors d'eau, rehaussement des digues) ;
- **SAM3** : Protections prioritaires de toutes les zones à enjeux (mise hors d'eau) et zone d'expansion des crues en plaines avec protections qui fonctionnent en décennale.

Scénario complémentaire :

- **SAM4** : Scénario Projet de la Bassée : prise en compte « optimiste » de l'ensemble des aménagements projetés participant à l'écroulement des crues (aménagement de la Bassée porté par l'EPTB Seine Grands Lacs).

Ces scénarios seraient menés pour un scénario en conditions actuelles, par exemple le scénario SCA2.

## 6. BIBLIOGRAPHIE

Le risque inondation : conditions de déclenchement et perspectives – Coordinateur : Hamza El Abida – Rapport GIP Seine Aval – 2009.

Evolution morphologique d'un estuaire anthropisé de 1800 à nos jours – Coordinatrice : Valérie Foussard – Rapport GIP Seine Aval – 2010.

Contexte climatique, morphologique & hydrosédimentaire : La marée dans l'estuaire de la Seine – GIP Seine Aval – 2012.

Contexte climatique, morphologique & hydrosédimentaire : Apport en eau douce à l'estuaire de la Seine – GIP Seine Aval – 2012.

Gestion globale du risque inondation en Gironde - RIG. Rapport d'étape 1 à 7, Rapport de synthèse, ARTELIA, 2012.

Etats de mer en Baie de Seine – Rapport d'étude – GLOBOCEAN – 2012.

Julien, Flavius Claudius Julianus (331-363), lettres, écrits et Discours, Œuvres complètes trad. Joseph Bidez, Les Belles Lettres, Paris. Lettres et fragments, édition 1924, réédition 2003, XXIV-445

Rapport « Evaluation des dommages liés aux crues en région Ile de France », HYDRATEC, 1998

Crue paroxystique du bassin versant de la Seine depuis 1870, IIBRBS, F. Gache, Fév. 2012, centenaire de la SHF.

Actes du colloque « Risques d'inondation en Ile-de-France, 100 ans après les crues de 1910 », SHF, Paris, 24-25 mars 2010

Actes du colloque « La crue de 1910, un siècle après », La Seine en partage, 1er décembre 2009

« Relire les jaugeages de la crue de la seine en 1910 a la lumière des mesures récentes a l'ADCP » ; D. Goutx et Y. Lacaze, DIREN IDF, 2009, Colloque SHF – MEDAD "Mesures hydrologiques et incertitudes" – Paris – Avril 2008

Coefficients variables à appliquer dans les vérifications des résultats. Jaugeages à l'aide des vitesses superficielles, Service hydrologique central du bassin de la Seine, Nouailhac-Pioch (14/01/1912).

Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique), SHOM & CETMEF, 2012.

Quantification de l'évolution spatio-temporelle de la contribution de la nappe de la Craie au débit de la Seine Aval, Massei N., Fritier N., 2010.

<http://www.drie.e.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/connaissance-et-prevision-des-r258.html>

[http://www.arehn.asso.fr/dossiers/catnat/catastrophes\\_climat.html](http://www.arehn.asso.fr/dossiers/catnat/catastrophes_climat.html)

Fronts froids et submersions de tempête dans le nord-ouest de la France. Le cas des inondations par la mer entre l'estuaire de la Seine et la baie de Somme. Rémi Caspar, Stéphane Costa, Eric Jakob – Mai 2007.

Les submersions de tempête de la nuit du 10 au 11 mars 2008 sur la côte d'Albâtre (Haute-Normandie, France) : détermination météo-marine - Rémi Caspar, Stéphane Costa, Pascal Lebreton, Pauline Letortu – NOROIS N°215 – 2010.

**Définition de scénarios et modélisation des niveaux d'eau pour la gestion du risque inondation dans l'estuaire de la Seine**

Objectif A

RAPPORT FINAL V2

---

Aspects météo-marins de la tempête du 10 mars 2008 en Atlantique et en Manche – Jean-Marie Cariolet, Stéphane Costa, Rémi Caspar, Fabrice Arduin, Rudy Magne et Gérard Goasguen - NOROIS N°215 – 2010.

Historique des tempêtes et des inondations à l'embouchure de la Seine – GIPSA, Université de Caen, ORMES, CODAH – Septembre 2012.

La tempête du 17 décembre 2004 sur le nord de la France – Communiqué de presse de Météo France – 18 décembre 2004.

Etude du changement climatique en Haute Normandie, MeteoFrance, Juin 2011 (<http://www.climats-energies.hautenormandie.fr/CLIMAT>)

Etude MEDCIE Nord-Pas de Calais-Picardie, « Les stratégie d'adaptation au changement climatique ». Synthèse Mars 2013.

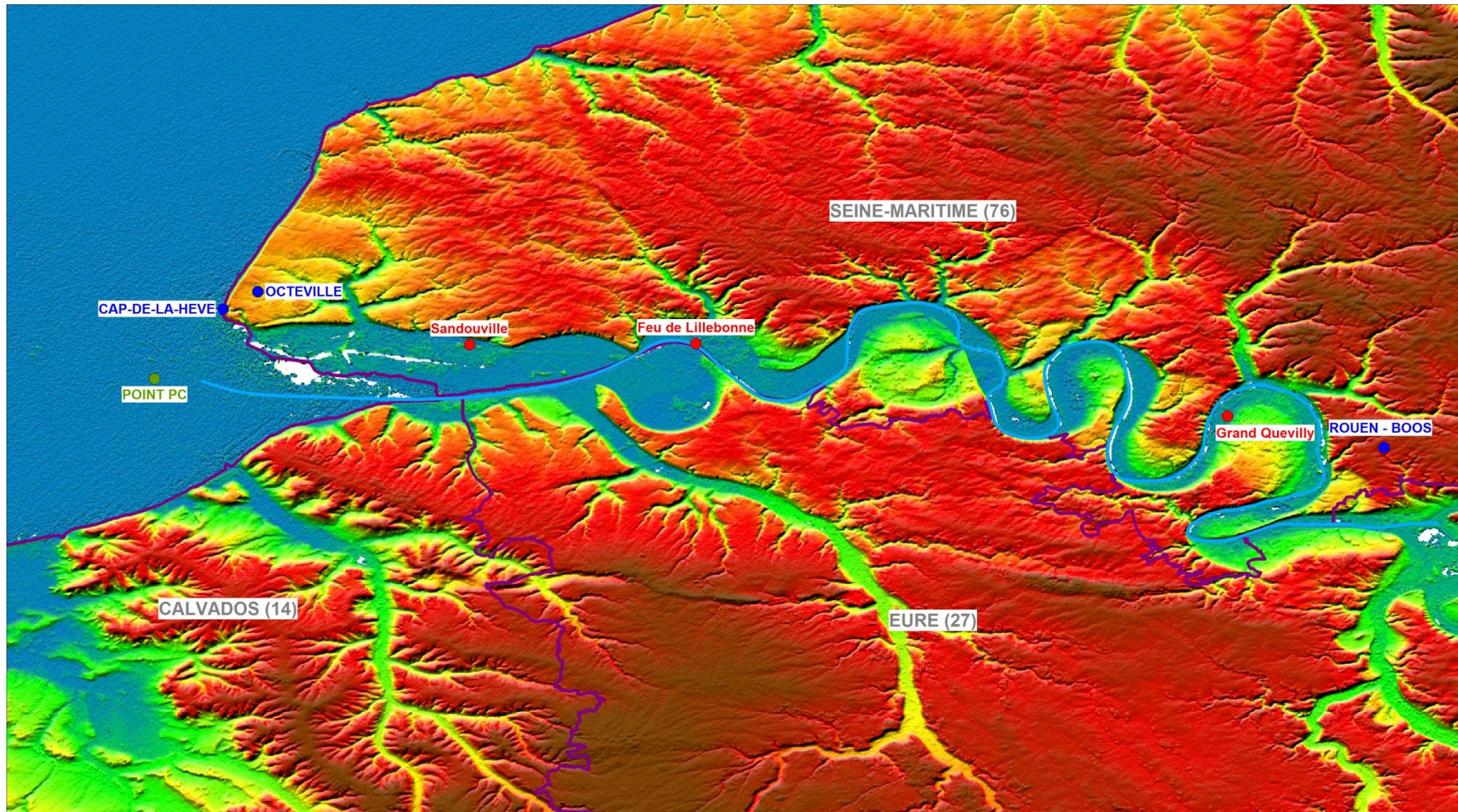
oOo

## **ANNEXE 1**

### **Rose des vents**

# GIP SEINE AVAL

## Qualification des vents le long de la Seine



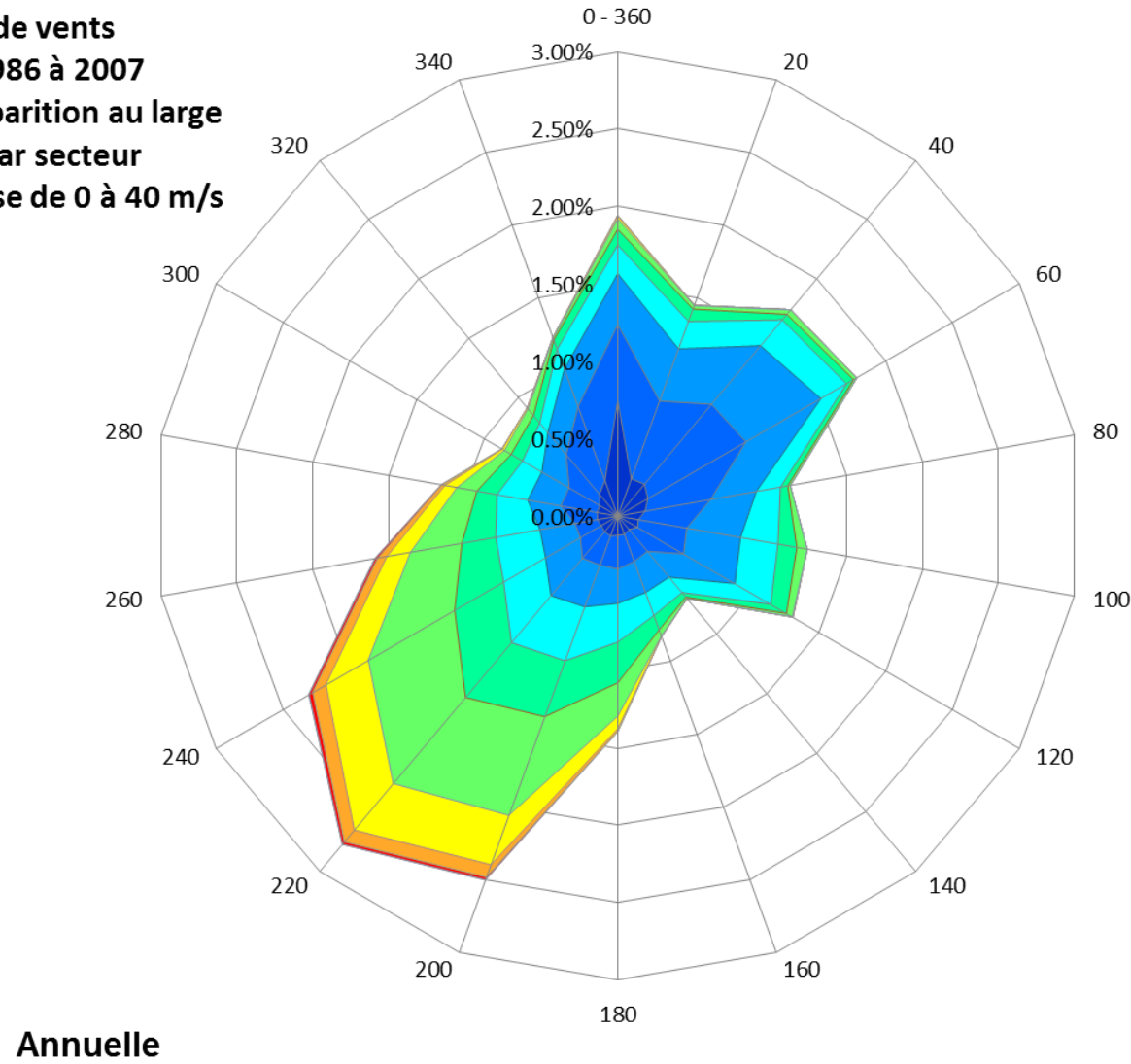
### Origine des Données de vents

Météo France :	Cap de la Hève (100m)
	Octeville (94m)
	Rouen (151m)
Air Normand :	Sandouville (altitude /mer : 6m )
	Feude Lillebonne (altitude /mer : 5m )
	Grand Quevilly ( altitude /mer : 8m )

# Cap de la Hève (pk 369.75)

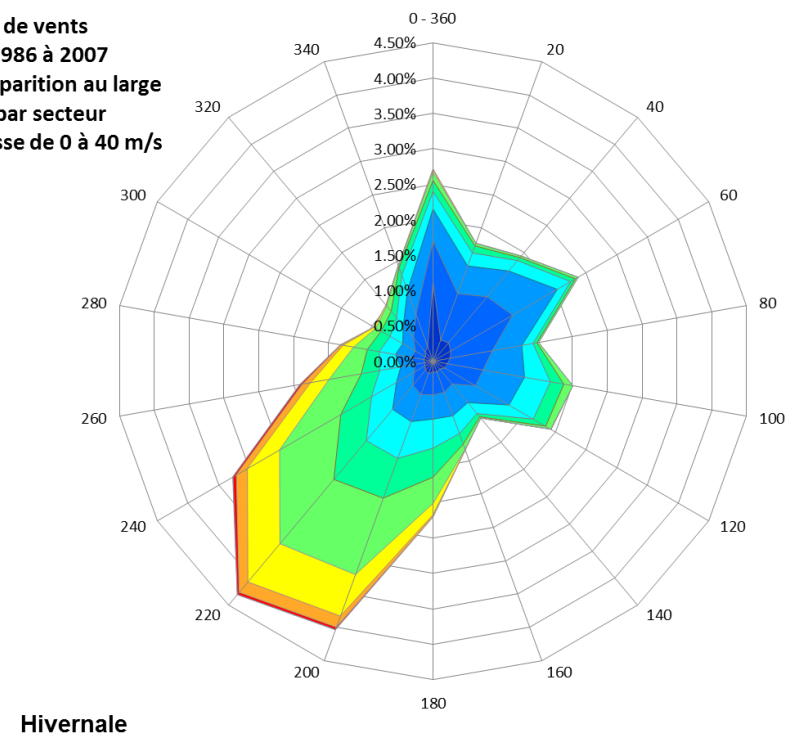
**Données de vents**  
 Climat de 1986 à 2007  
 Occurences d'apparition au large  
 Cumulées par secteur  
 et classe de vitesse de 0 à 40 m/s

- Classes en m/s
- <40
  - <30
  - <26
  - <22
  - <18
  - <14
  - <10
  - <8
  - <6
  - <4
  - <2



**Données de vents**  
 Climat de 1986 à 2007  
 Occurences d'apparition au large  
 Cumulées par secteur  
 et classe de vitesse de 0 à 40 m/s

- Classes en m/s
- <40
  - <30
  - <26
  - <22
  - <18
  - <14
  - <10
  - <8
  - <6
  - <4
  - <2



**Données de vents**  
 Climat de 1986 à 2007  
 Occurences d'apparition au large  
 Cumulées par secteur  
 et classe de vitesse de 0 à 40 m/s

- Classes en m/s
- <40
  - <30
  - <26
  - <22
  - <18
  - <14
  - <10
  - <8
  - <6
  - <4
  - <2

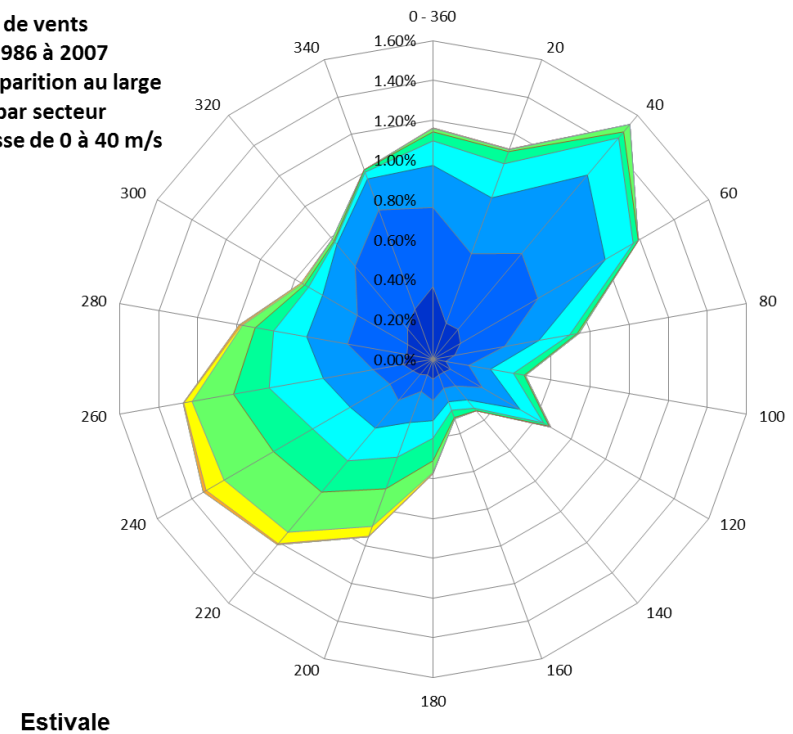


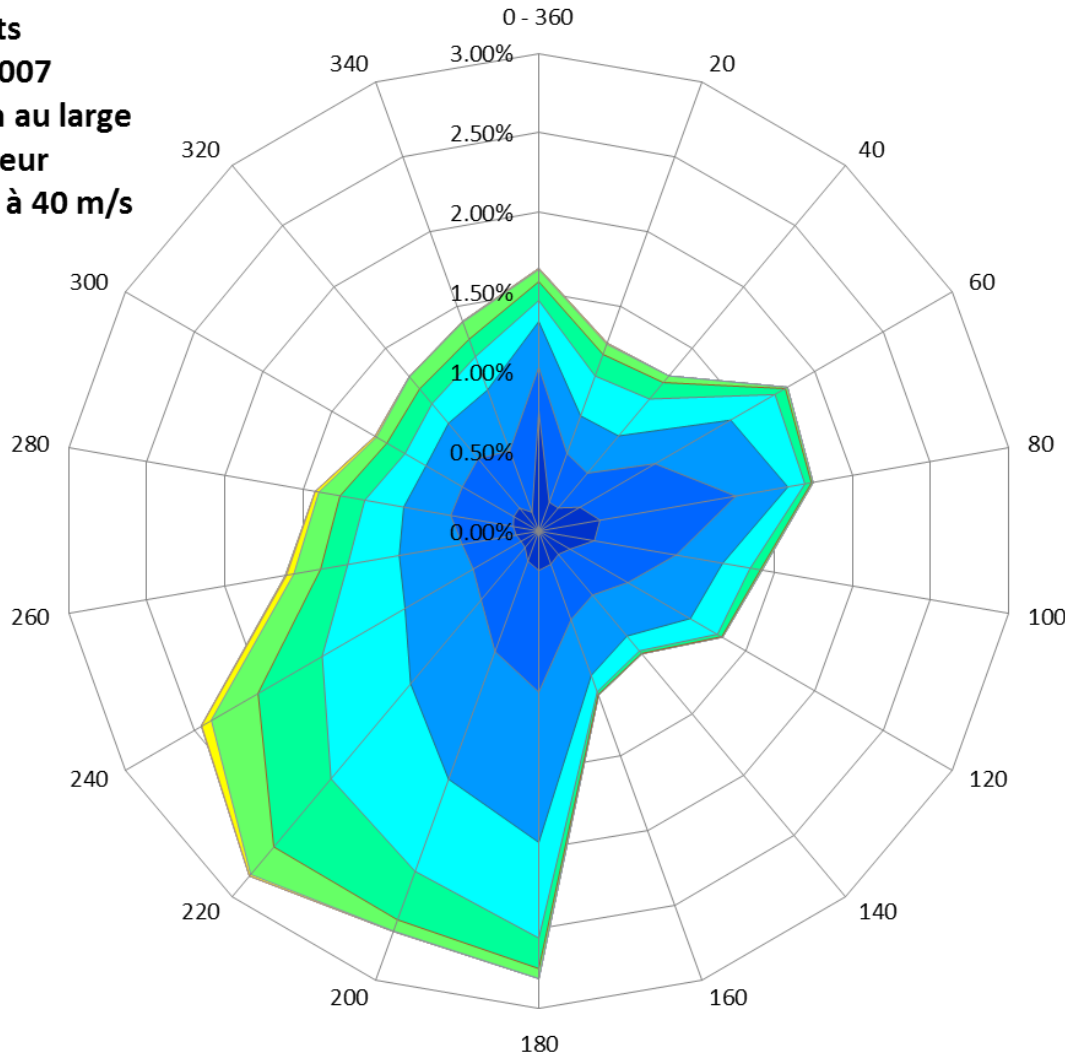
Figure - 1



# Octeville (pk 369.75)

**Données de vents**  
 Climat de 1994 à 2007  
 Occurences d'apparition au large  
 Cumulées par secteur  
 et classe de vitesse de 0 à 40 m/s

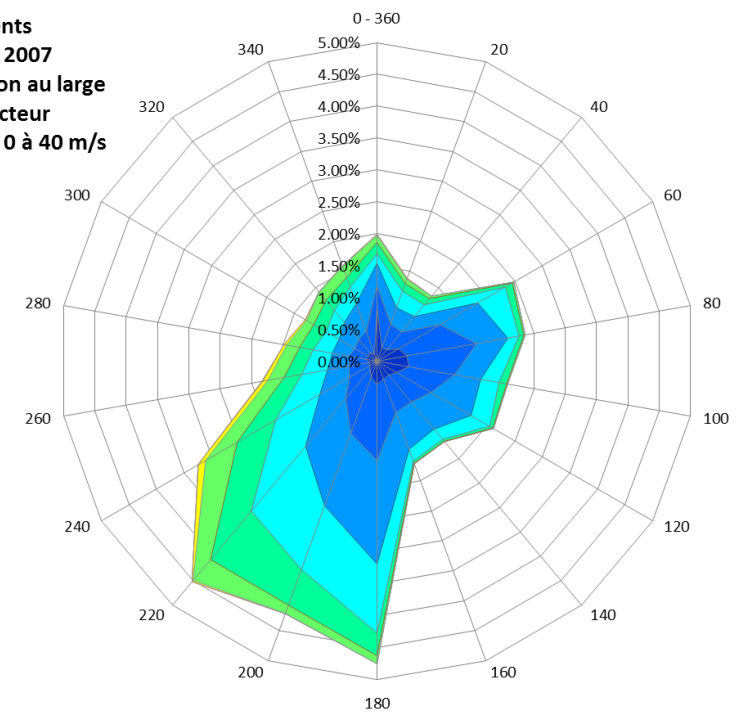
- Classes en m/s
- <40
  - <30
  - <26
  - <22
  - <18
  - <14
  - <10
  - <8
  - <6
  - <4
  - <2



Annuelle

**Données de vents**  
 Climat de 1994 à 2007  
 Occurences d'apparition au large  
 Cumulées par secteur  
 et classe de vitesse de 0 à 40 m/s

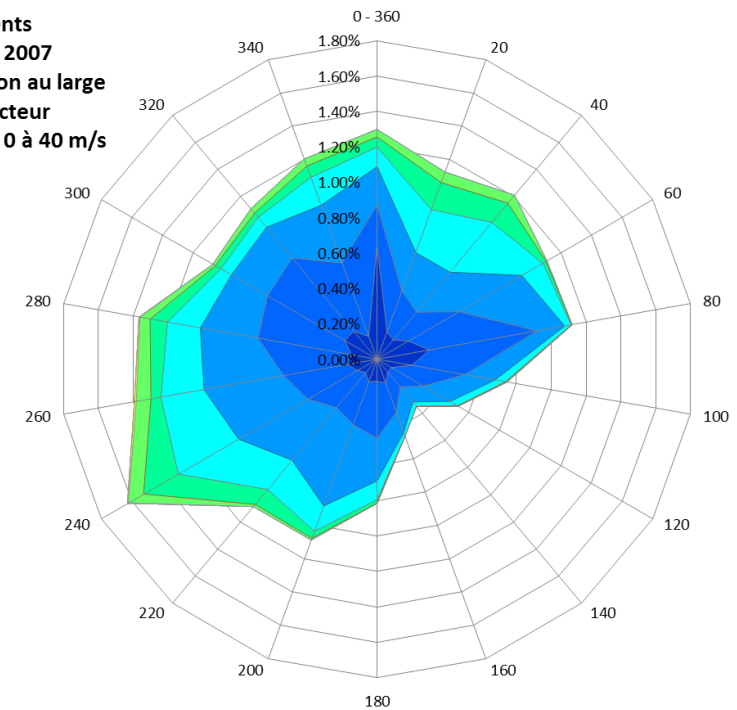
- Classes en m/s
- <40
  - <30
  - <26
  - <22
  - <18
  - <14
  - <10
  - <8
  - <6
  - <4
  - <2



Hivernale

**Données de vents**  
 Climat de 1994 à 2007  
 Occurences d'apparition au large  
 Cumulées par secteur  
 et classe de vitesse de 0 à 40 m/s

- Classes en m/s
- <40
  - <30
  - <26
  - <22
  - <18
  - <14
  - <10
  - <8
  - <6
  - <4
  - <2



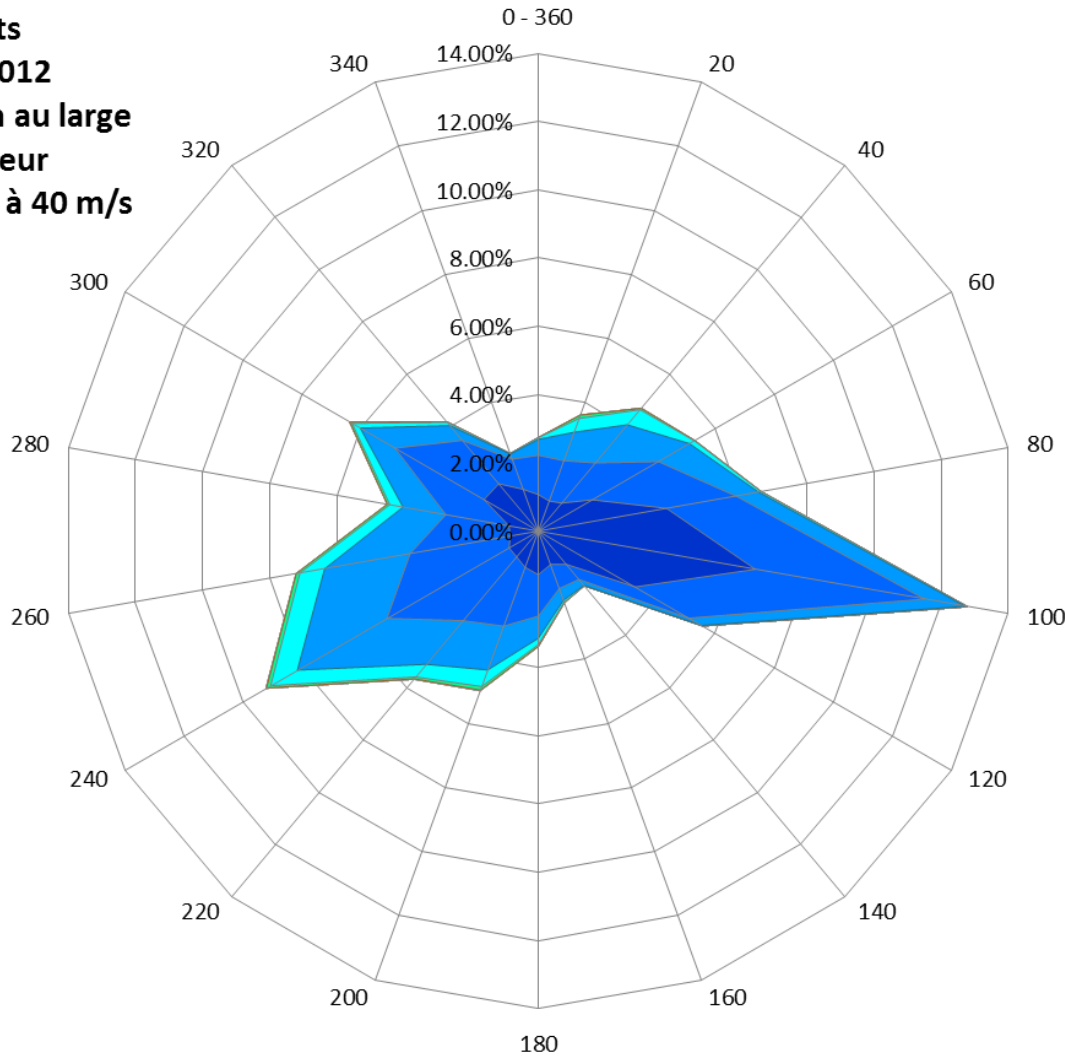
Estivale

Figure - 2

# Sandouville (pk 350.5)

**Données de vents**  
 Climat de 2005 à 2012  
 Occurences d'apparition au large  
 Cumulées par secteur  
 et classe de vitesse de 0 à 40 m/s

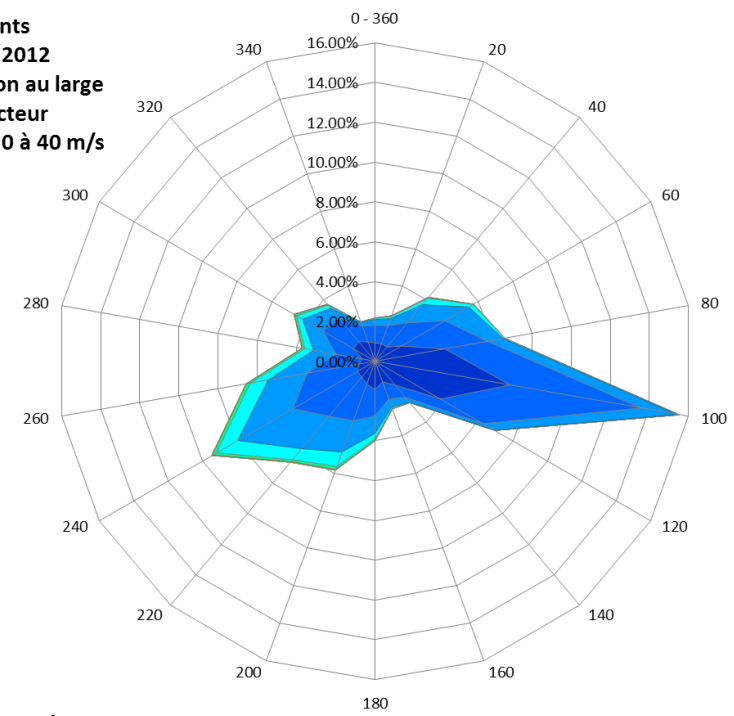
- Classes en m/s
- <40
  - <30
  - <26
  - <22
  - <18
  - <14
  - <10
  - <8
  - <6
  - <4
  - <2



Annuelle

**Données de vents**  
 Climat de 2005 à 2012  
 Occurences d'apparition au large  
 Cumulées par secteur  
 et classe de vitesse de 0 à 40 m/s

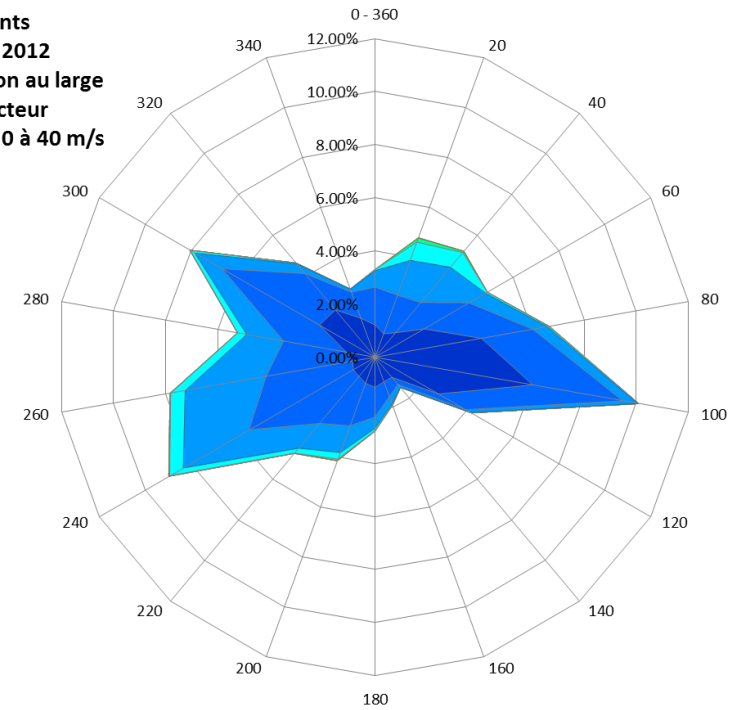
- Classes en m/s
- <40
  - <30
  - <26
  - <22
  - <18
  - <14
  - <10
  - <8
  - <6
  - <4
  - <2



Hivernale

**Données de vents**  
 Climat de 2005 à 2012  
 Occurences d'apparition au large  
 Cumulées par secteur  
 et classe de vitesse de 0 à 40 m/s

- Classes en m/s
- <40
  - <30
  - <26
  - <22
  - <18
  - <14
  - <10
  - <8
  - <6
  - <4
  - <2



Estivale

Figure - 3

# Feu Lillebonne (pk 333.4)

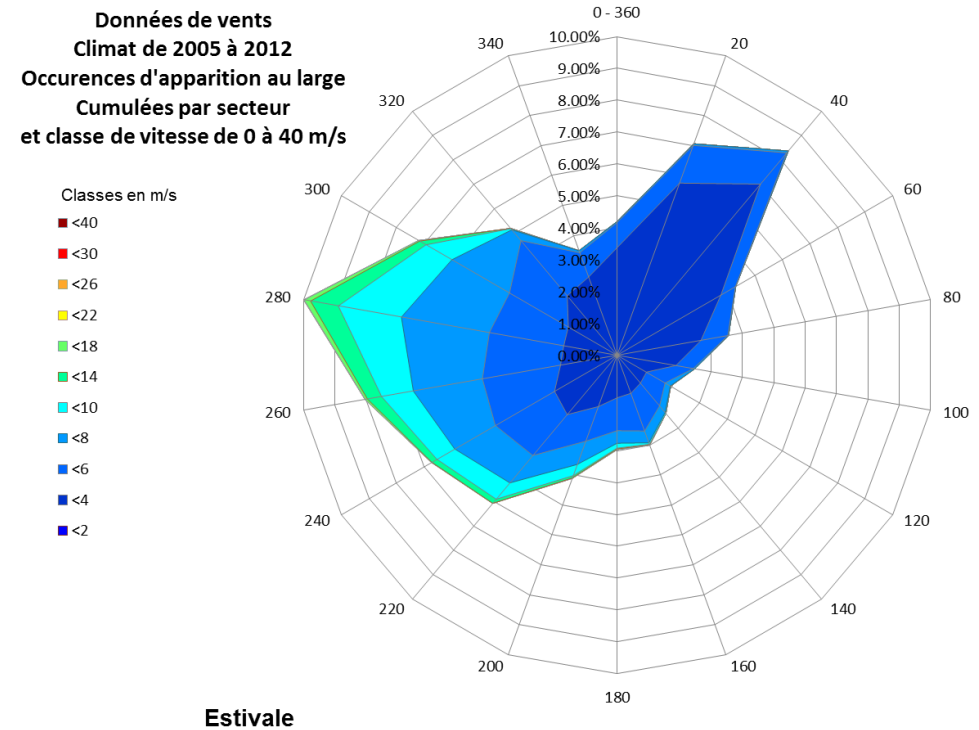
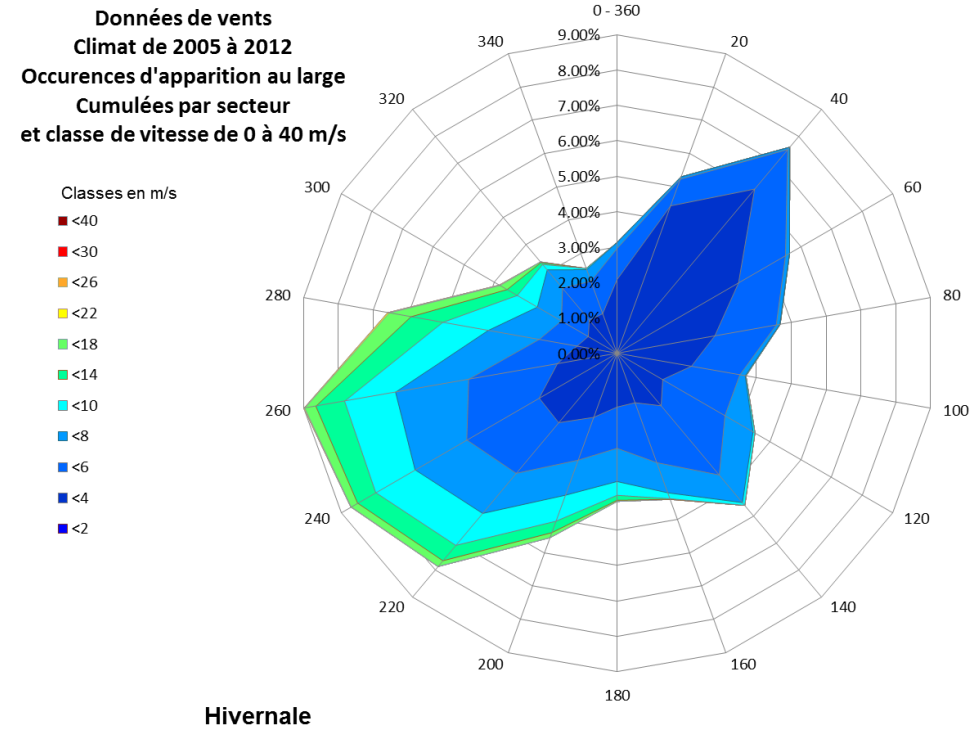
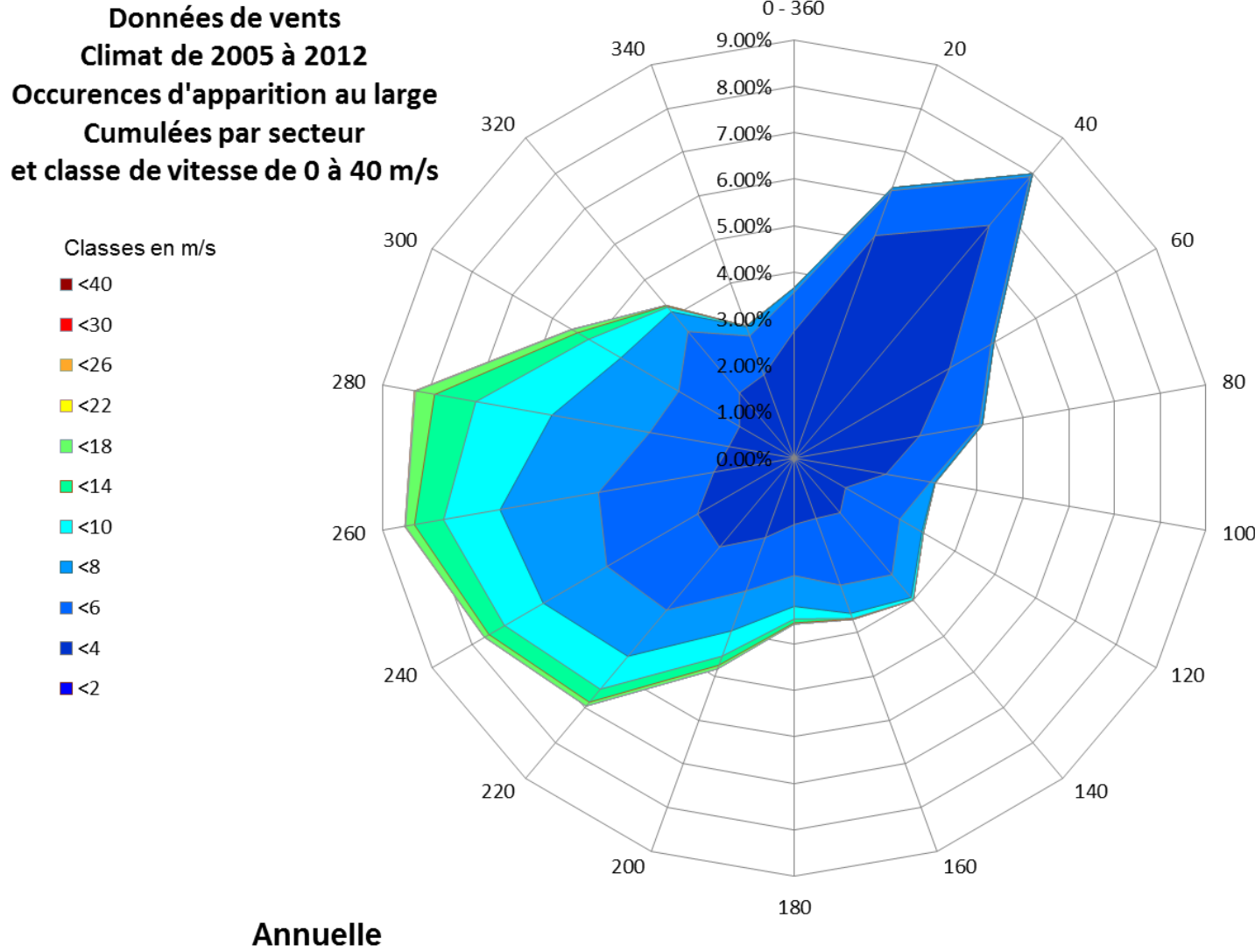


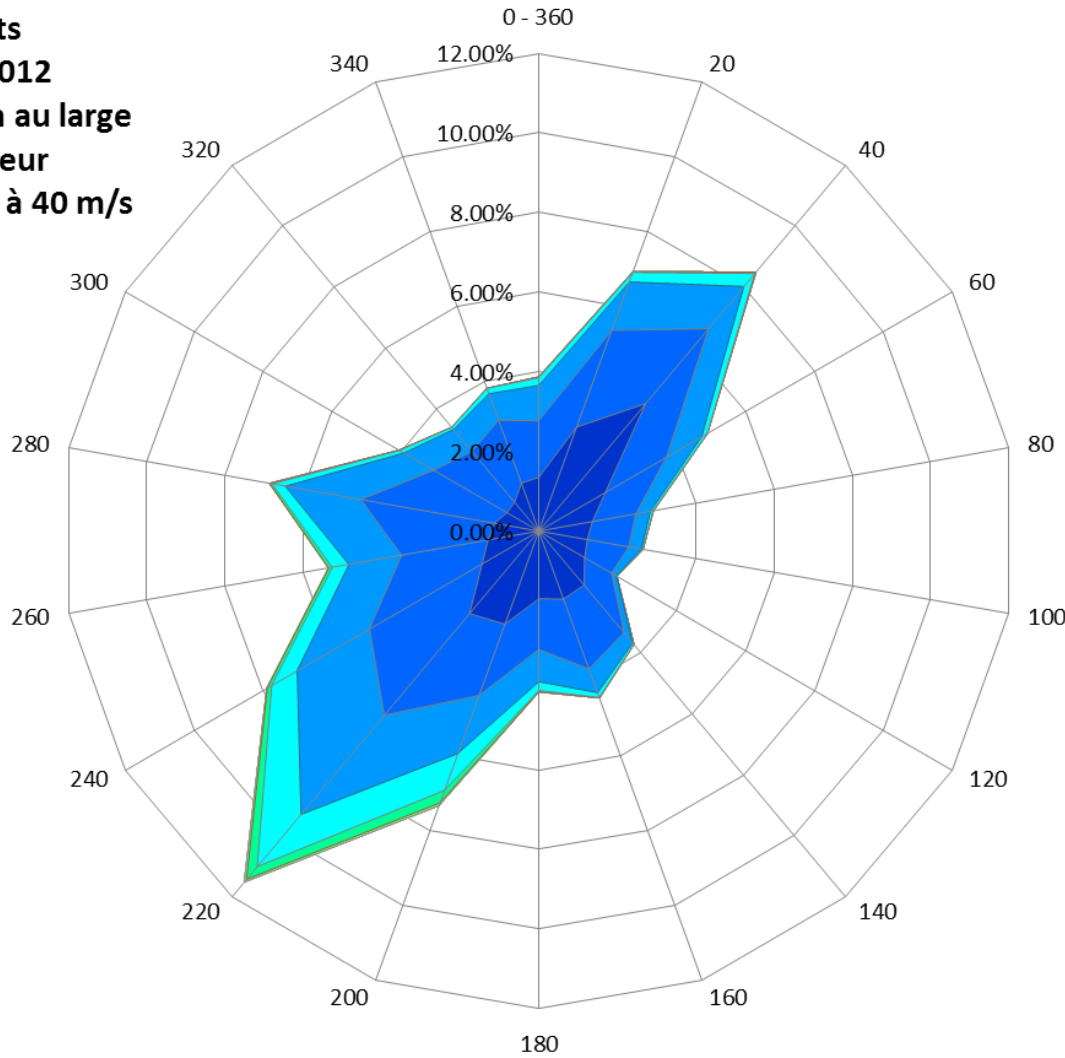
Figure - 4

# Grand Quevilly (pk 248.75)

**Données de vents**  
Climat de 2005 à 2012  
Occurrences d'apparition au large  
Cumulées par secteur  
et classe de vitesse de 0 à 40 m/s

Classes en m/s

- <40
- <30
- <26
- <22
- <18
- <14
- <10
- <8
- <6
- <4
- <2

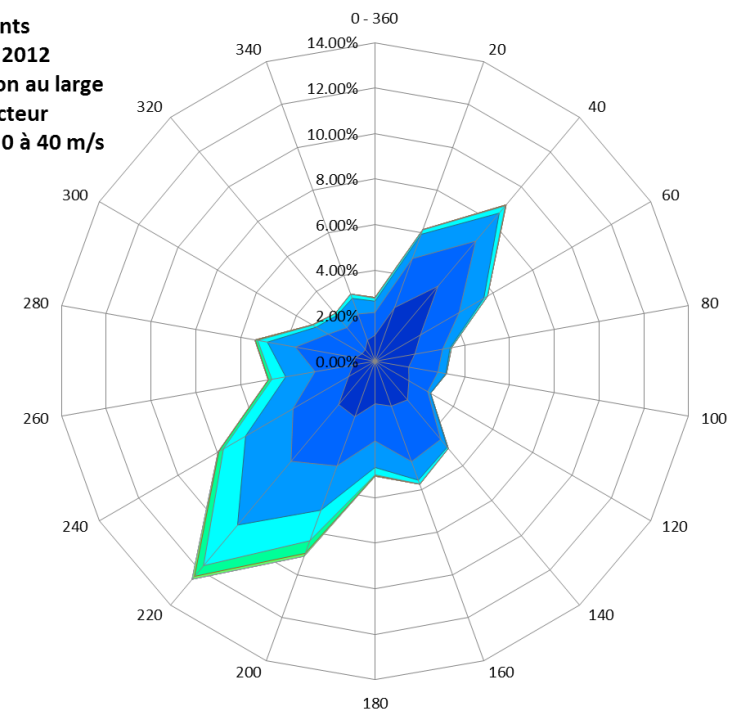


Annuelle

**Données de vents**  
Climat de 2005 à 2012  
Occurrences d'apparition au large  
Cumulées par secteur  
et classe de vitesse de 0 à 40 m/s

Classes en m/s

- <40
- <30
- <26
- <22
- <18
- <14
- <10
- <8
- <6
- <4
- <2

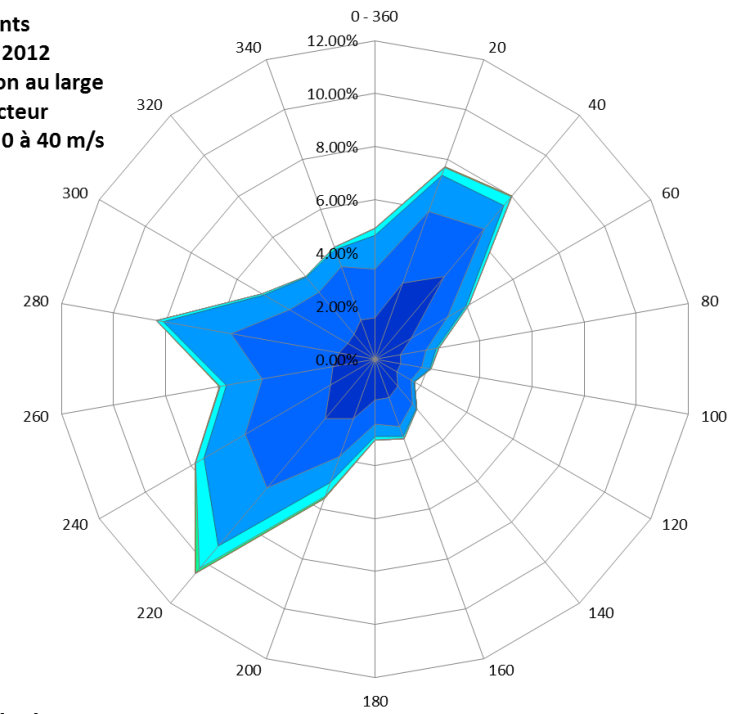


Hivernale

**Données de vents**  
Climat de 2005 à 2012  
Occurrences d'apparition au large  
Cumulées par secteur  
et classe de vitesse de 0 à 40 m/s

Classes en m/s

- <40
- <30
- <26
- <22
- <18
- <14
- <10
- <8
- <6
- <4
- <2



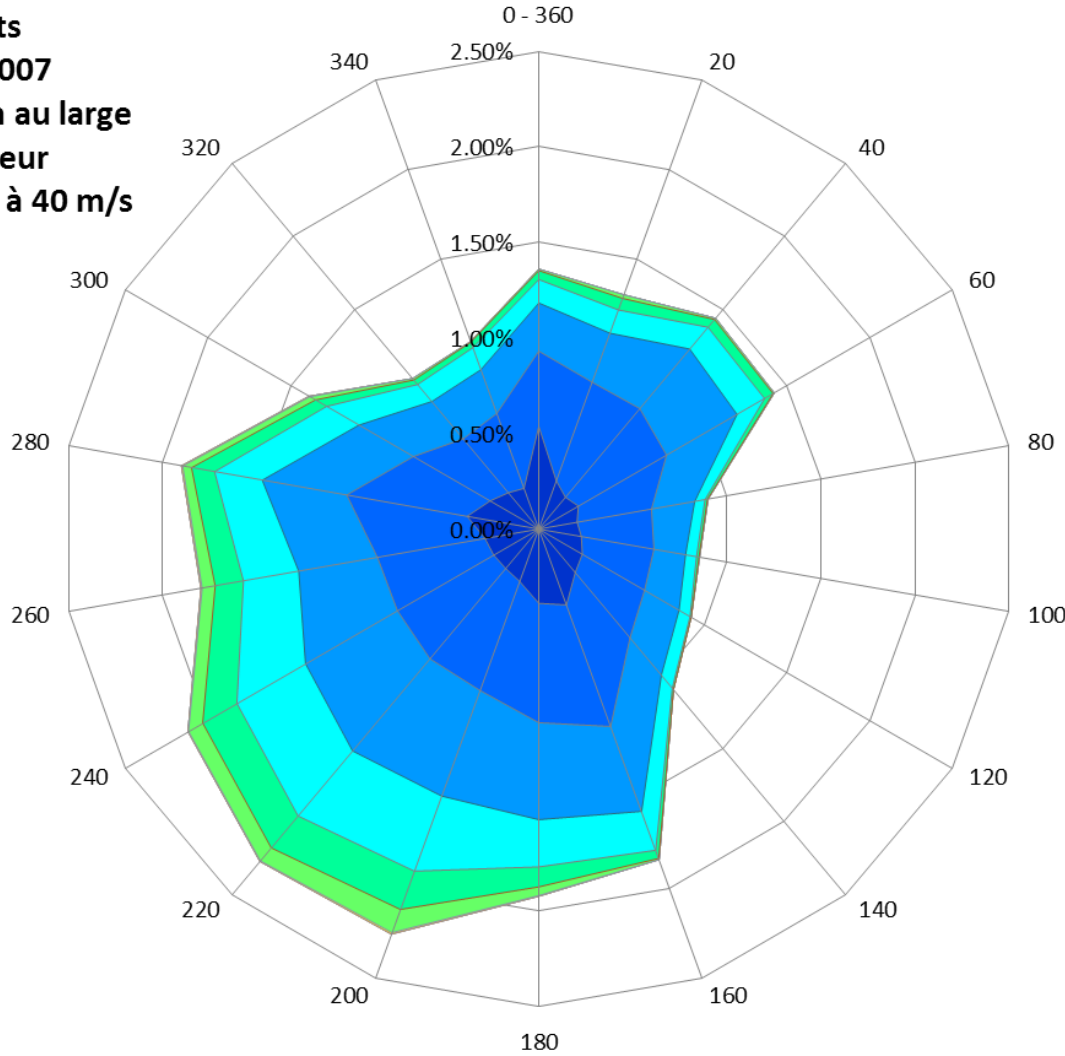
Estivale

Figure - 5

# Rouen (pk 242.5)

**Données de vents**  
 Climat de 1986 à 2007  
 Occurences d'apparition au large  
 Cumulées par secteur  
 et classe de vitesse de 0 à 40 m/s

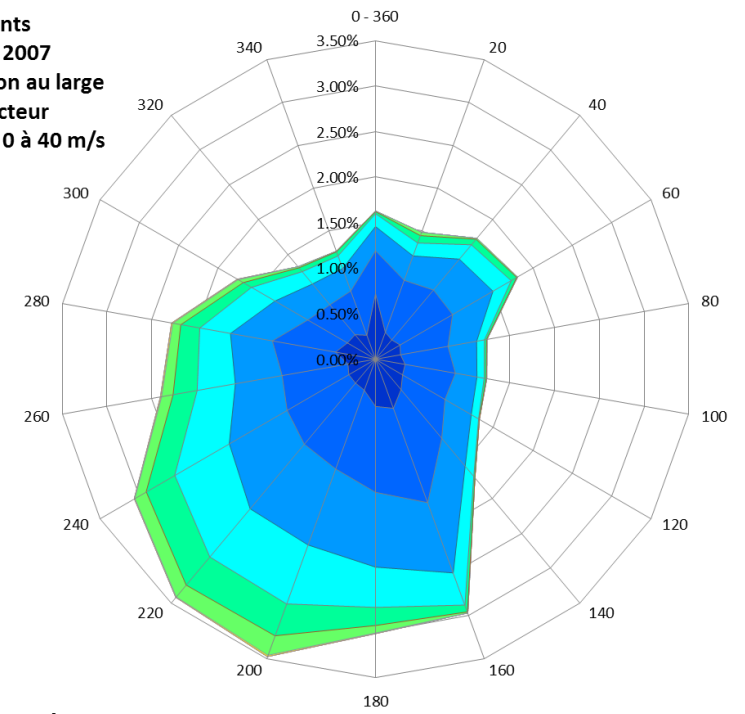
- Classes en m/s
- <40
  - <30
  - <26
  - <22
  - <18
  - <14
  - <10
  - <8
  - <6
  - <4
  - <2



Annuelle

**Données de vents**  
 Climat de 1986 à 2007  
 Occurences d'apparition au large  
 Cumulées par secteur  
 et classe de vitesse de 0 à 40 m/s

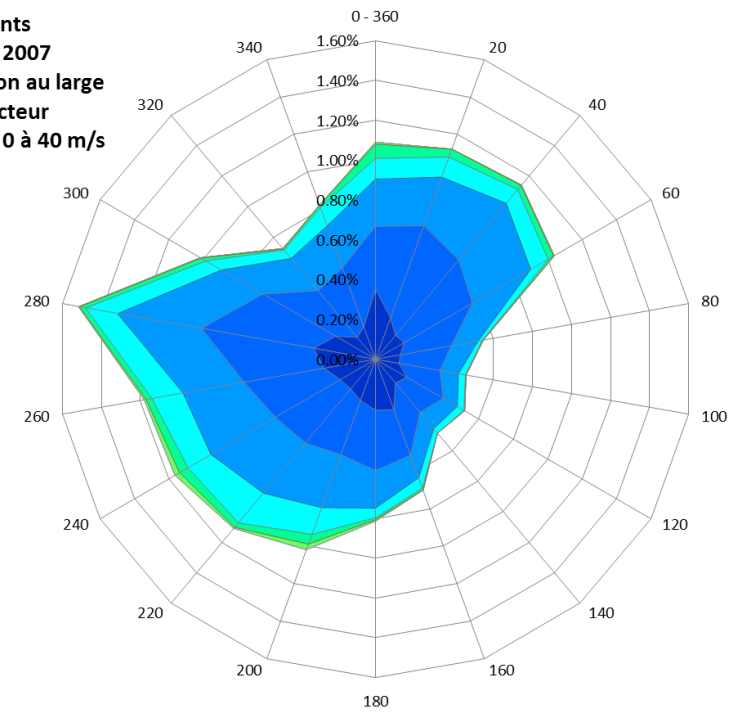
- Classes en m/s
- <40
  - <30
  - <26
  - <22
  - <18
  - <14
  - <10
  - <8
  - <6
  - <4
  - <2



Hivernale

**Données de vents**  
 Climat de 1986 à 2007  
 Occurences d'apparition au large  
 Cumulées par secteur  
 et classe de vitesse de 0 à 40 m/s

- Classes en m/s
- <40
  - <30
  - <26
  - <22
  - <18
  - <14
  - <10
  - <8
  - <6
  - <4
  - <2



Estivale

Figure - 6

## **ANNEXE 2**

# **Profils le long de l'estuaire des surcotes liées au vent calculées par modélisation**

- Graph 1 :** Vent de direction N180, Amplitude 0, 13, 17, 24 + Vent de direction 160, Amplitude 20,7
- Graph 2 :** Vent de direction N200, Amplitude 0, 13, 17, 20,7, 24
- Graph 3 :** Vent de direction N230, Amplitude 0, 13, 17, 20,7, 24
- Graph 4 :** Vent de direction N260, Amplitude 0, 13, 17, 20,7, 24
- Graph 5 :** Vent de direction N300, Amplitude 0, 13, 17, 20,7, 24
- Graph 6 :** Vent d'amplitude 20,7, Direction 160, 200, 230, 260, 300

