

pression) en surface, en cours), aussi la présente note ne traite-t-elle pas de ce secteur.

L'enjeu est donc de pouvoir associer à ces prévisions, et au droit de la « zone d'influence » de chaque marégraphe, une cartographie de la zone inondée prévue correspondante.

2.- Quelques éléments descriptifs du fonctionnement de l'estuaire

Le linéaire de Poses de Tancarville est d'environ 140 km ; soit une densité de points de mesures de l'ordre d'un marégraphe tous les 10 km.

Le tronçon Seine aval présente un fonctionnement à dominante « fluviale » en amont de Rouen (importance du débit de la Seine dans l'explication des cotes maximales observées), à dominante « fluvio-martime » (combinaison crue + tempête), puis « maritime » à l'aval (importance du coefficient de marée, des surcotes de PM, et des éléments (vents, pression) dans l'explication des cotes maximales observées).

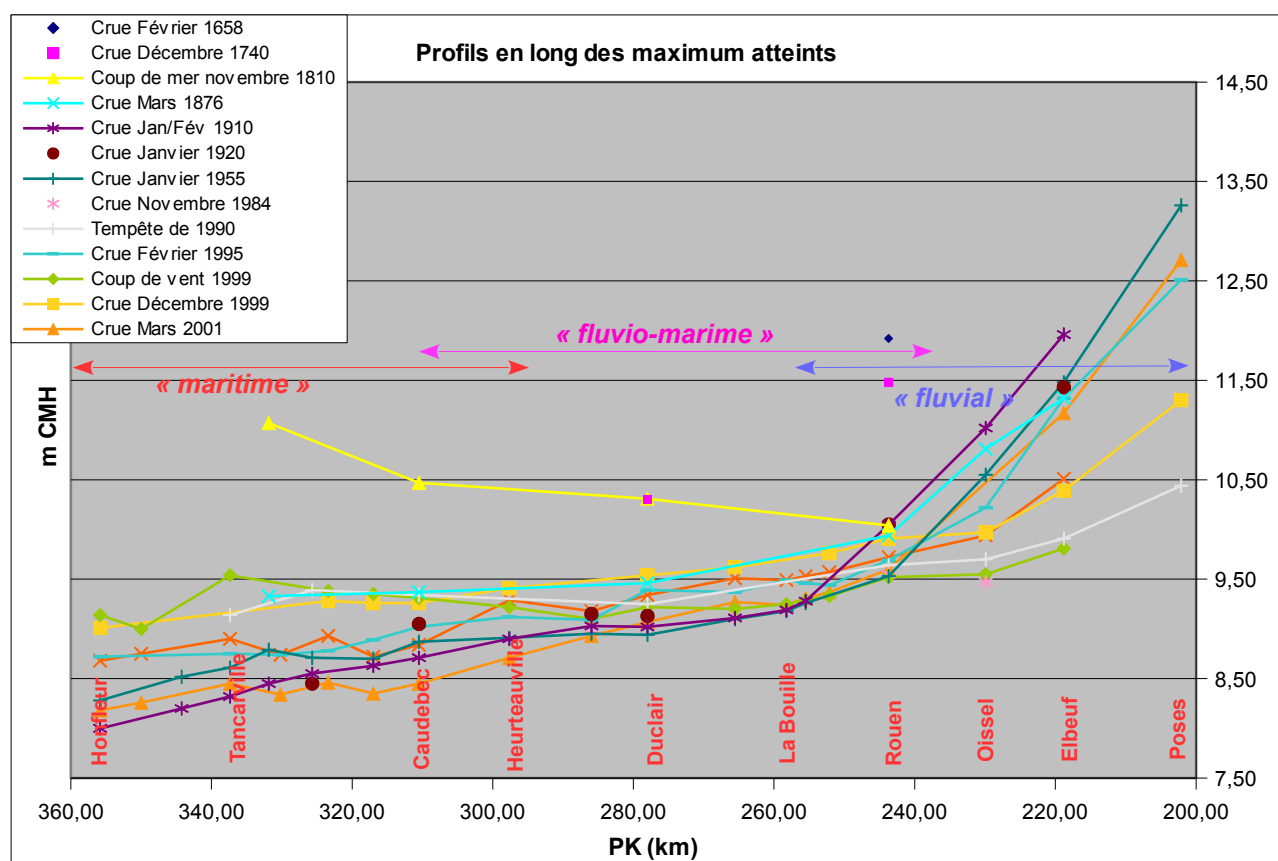


Illustration 2 : profils en long des maximum atteints (m CMH), et fonctionnements dominants dans l'explication des maximum atteints

En règle générale, la pleine mer au Havre est observée environ 6h plus tard au marégraphe de Rouen (« durée » fonction du débit de la Seine et de la marée) ; la tenue de plein est de l'ordre de l'heure à quelques heures sur la plupart des marégraphes (4h max).

Pour un débit de Seine de $250 \text{ m}^3/\text{s}$ (inférieur au module), le marnage observé est de l'ordre de :

Coefficient de marée	Le Havre	St Léonard	Caudebec	Rouen
40	3,30 m	3,30 m	2,70 m	2,40 m
70	5 m	4,50 m	3,70 m	3 m
90	6,50 m	5,40 m	4,50 m	3,40 m
110	7,70 m	5,90 m	5 m	3,50 m

Tableau 1 : coefficients de marée et ordres de grandeur des marnages aux marégraphes du Havre, de St Léonard, de Caudebec et Rouen, pour un débit de la Seine $Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$

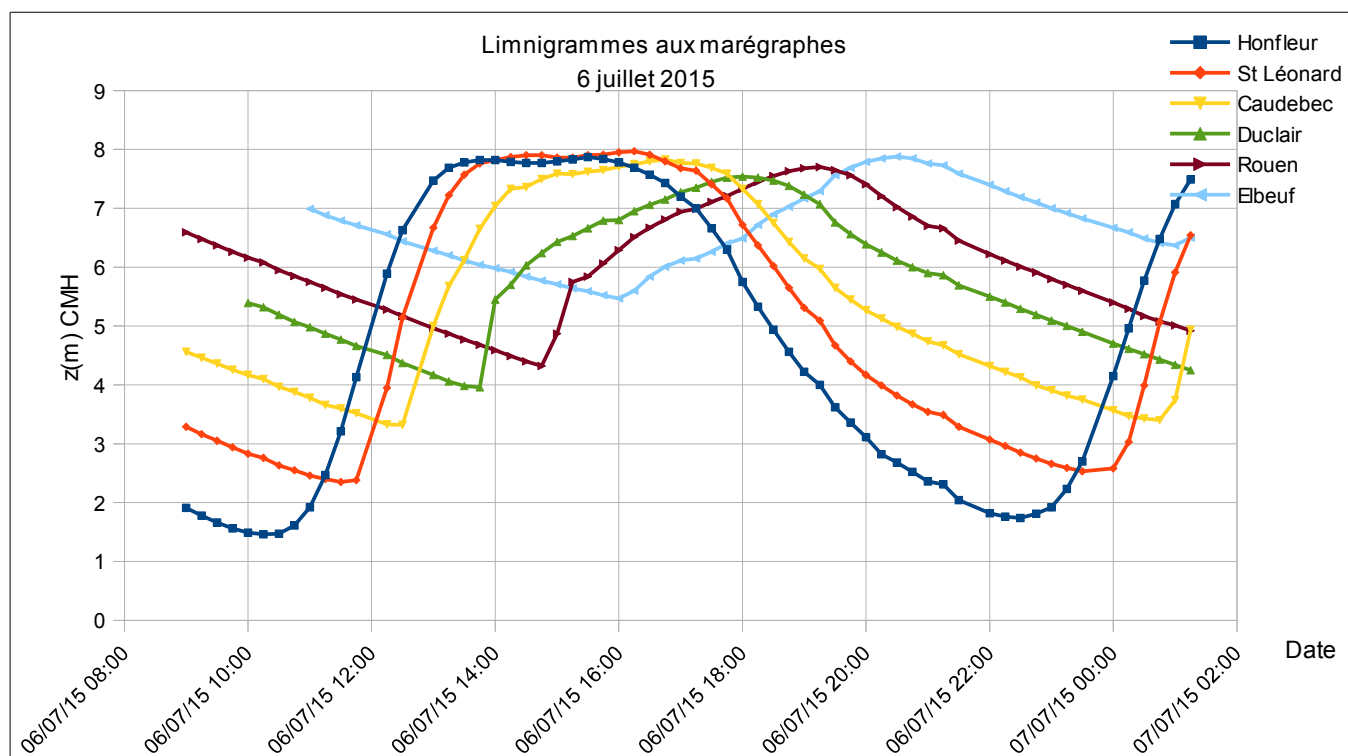


Illustration 3 : limnigrammes « types » (hors crue de la Seine) aux marégraphes d'Honfleur, St Léonard, Caudebec, Duclair, Rouen et Elbeuf (situation du 6 juillet 2015, coefficient de marée 91, $Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$)

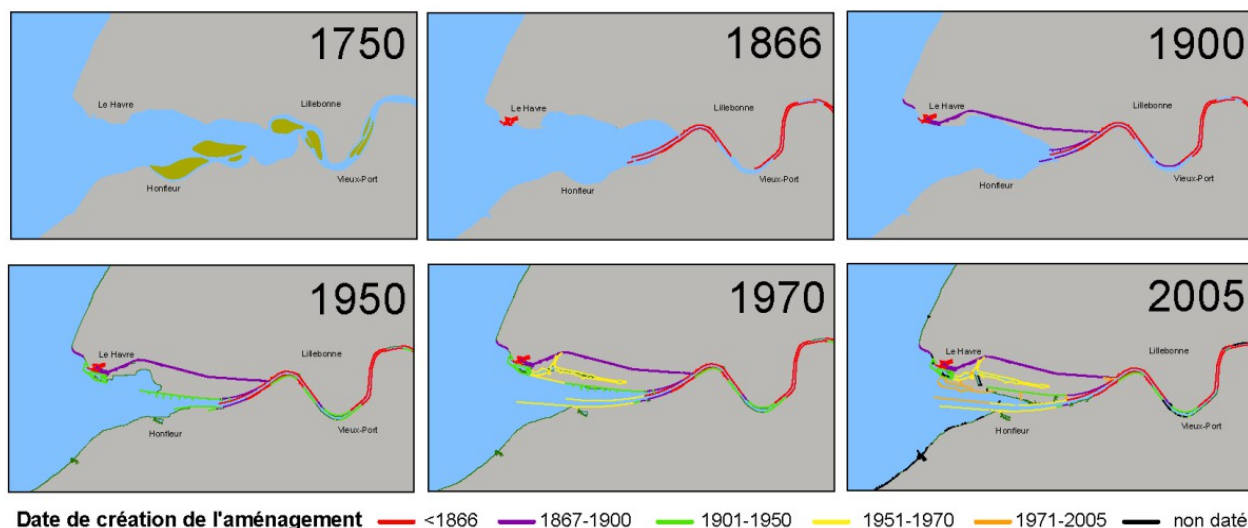
On constate sur les marégraphes « aval » (cf. secteur à dominante « maritime ») le fort gradient de montée au flot (limnigrammes non « symétriques », la descente au jusant étant plus longue) et des tenues de plein importantes, de l'ordre 4h (avec souvent « deux pics »). A partir de Duclair, le gradient de montée fort à la bascule diminue ensuite (Duclair, Rouen) et les tenues de plein sont aussi plus faibles, de l'ordre de l'heure ; cette tendance s'accroissant plus on va vers l'amont (Elbeuf).

En crue le marnage au droit des marégraphes, et en particulier ceux de l'amont : Poses, Elbeuf, Oissel et Rouen, va se réduire (la réduction étant la plus forte en amont) et la tenue de plein augmenter.

A titre d'exemple, lors de la crue de 1955, on observait une absence de marnage à Poses, tandis que le marnage était réduit de 65 % à Rouen (cf. Mesures de débit faites en Seine-Maritime au cours de la crue de janvier 1955, par D. Laval, La Houille Blanche, 1955).

Le marnage à Rouen, de l'ordre de 3,50 m pour un débit $Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$ et un coefficient de marée 110, chute à moins de 2,50 m pour la crue de février 1995 ($Q = 2080 \text{ m}^3/\text{s}$ et coefficient de marée 104).

Pour la crue de janvier/février 1910, nous ne disposons malheureusement que de deux relevés quotidiens (et non de relevés à une fréquence supérieure) qui ne permettent pas de rendre compte du marnage effectivement constaté lors de la crue de 1910. Sans doute celui-ci était-il plus faible que celui qui interviendrait pour une situation hydrologiquement identique aujourd'hui, en particulier compte tenu de la forte reconfiguration de l'estuaire, notamment sur sa partie aval (cf. illustration ci-dessous), mais aussi en amont (cf. secteurs des îles sur Oissel), et de son recalibrage. Pour mémoire l'article de D. Laval (1955) mentionne un marnage à Rouen de 1,58 m (coeff. 45), et de 2,43 m (coeff. 110) pour un débit de Seine $Q = 250 \text{ m}^3/\text{s}$ contre de l'ordre de 2,50 m et 3,50 m pour des situations identiques aujourd'hui.



GIP Seine-Aval, 2009 - Source des données : Foussard *et al.*, 2009

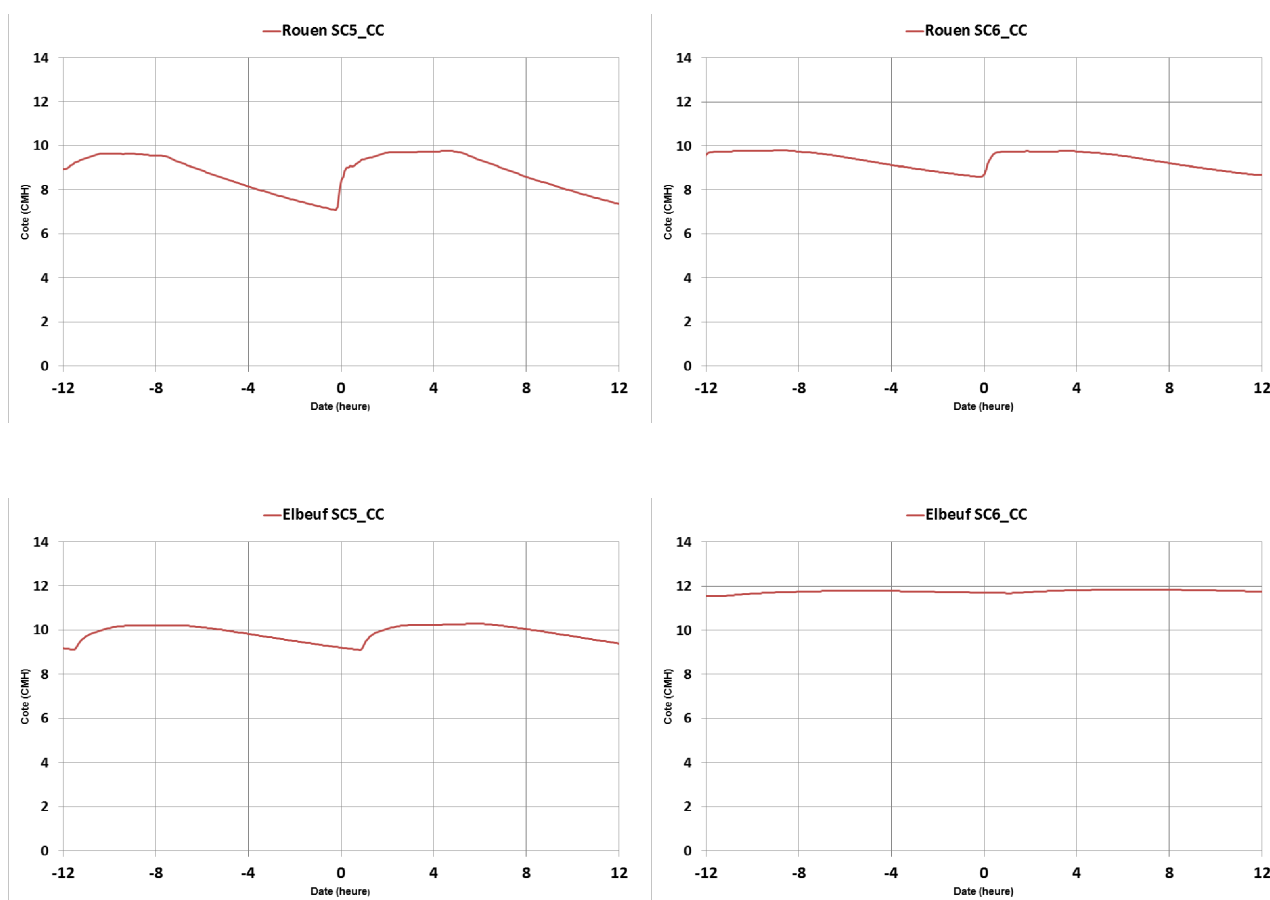
Illustration 4 : évolution de l'aménagement de l'embouchure de Seine (GIPSA, 2009)

À titre indicatif, nous faisons figurer ci-dessous les résultats au droit des marégraphes de Caudebec, La Bouille, Rouen et Elbeuf (issus de l'étude Artelia menée pour le compte du GIPSA), correspondant aux deux scénarios « extrêmes » suivants :

- une situation de tempête avec un débit de Seine soutenu (type « décembre 1999 », $Q = 1\,407 \text{ m}^3/\text{s}$ à Poses avec une marée de coefficient fort (106), et une surélévation du niveau marin de + 60 cm), scénario SC5_CC ;
- une situation de crue de la Seine ($Q = 3\,000 \text{ m}^3/\text{s}$, type « 1910 »), avec une marée de coefficient moyen (78), et une surélévation du niveau marin de + 60 cm, scénario SC6_CC.

	Cote des premiers débordements m CMH	Marnage		Tenue de plein		Durée au-delà de la cote de premiers débordements		Cote maximale atteinte m CMH	
		« décembre 1999 »	« 1910 »	« décembre 1999 »	« 1910 »	« décembre 1999 »	« 1910 »	« décembre 1999 »	« 1910 »
Marégraphe de Caudebec	9 m	4,5 m	3,75 m	4 h	2,5 h	4,2 h	-	9,43 m	8,87 m
Marégraphe de La Bouille	8,90 m	3 m	1,45 m	< 1,5 h	3 h	5,9 h	6,3 h	9,62 m	9,43 m
Marégraphe de Rouen	9,20 m	2,75 m	1,50 m	2,9 h	4 h	6,2 h	9,4 h	9,77 m	9,77 m
Marégraphe d'Elbeuf	9,50 m	1,25 m	< 0,20 m	3,4 h	>> 24 h (= durée de la crue)	10 h	>> 24 h (= durée de la crue)	11,73 m	11,84 m

Tableau 2 : exploitation des résultats de l'étude Artelia au droit des marégraphes de Caudebec, La Bouille, Rouen et Elbeuf pour les scénarios SC5_CC et SC6_CC, (GIPSA, Rapport Artelia, Objectif D, rapport final V1, janvier 2014)



Illustrations 5 à 8 : résultats des modélisations des scénarios SC5_CC et SC6_CC au droit des marégraphes de Rouen et Elbeuf (GIPSA, Rapport Artelia, Objectif D, rapport final V1, janvier 2014)

Sur Rouen, la cote maximale observée lors de la tempête de décembre 1999 s'établissait à 9,91 m CMH, tandis qu'elle était de 10,05 m CMH en 1910, au droit du marégraphe Jean Ango. Pour autant les conséquences entre ces deux événements n'ont pas du tout été de la même ampleur : alors que lors de la crue de 1910, un niveau élevé s'est maintenu avec un faible marnage pendant plusieurs jours consécutifs, il se concentrait lors de la tempête de 1999 au pic de pleine mer d'une durée de quelques heures ; le lit majeur mobilisé se ressuyant en suivant la « marée » descendante.

On devine à la lecture de ces résultats que la seule donnée de cote marine maximale prévue ou observée ne sera pas toujours de nature, à elle seule, à permettre de rendre compte de l'ampleur des enjeux touchés : la durée des « débordements » peut être tantôt relativement réduite et générer des volumes non susceptibles de mobiliser l'ensemble du lit majeur situé sous cette même cote (cf. différence entre la cartographie de la ligne d'eau projetée et de l'enveloppe des zones effectivement inondées sur le val de Sahurs pour l'événement de décembre 1999 illustration ci-contre), tandis que dans d'autres situations elle sera effectivement susceptible de mobiliser l'ensemble du lit

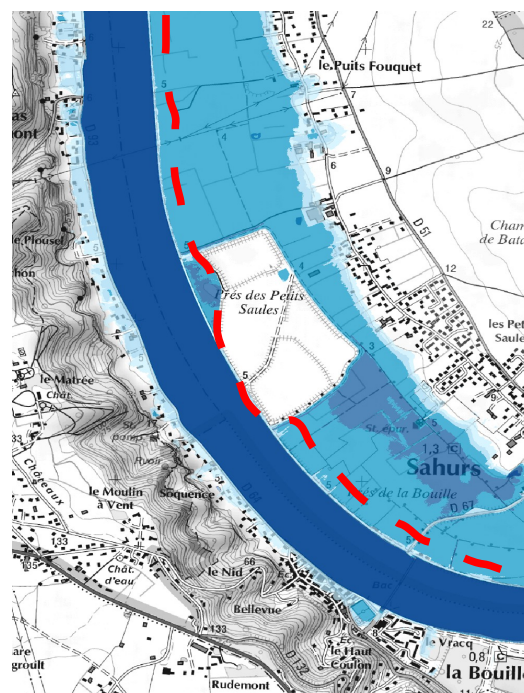


Illustration 9 : le val de Sahurs (enveloppe et aléas correspondant à la ligne d'eau « projetée », et limite de la zone inondée effectivement constatée —) pour l'événement de décembre 1999

majeur concerné.

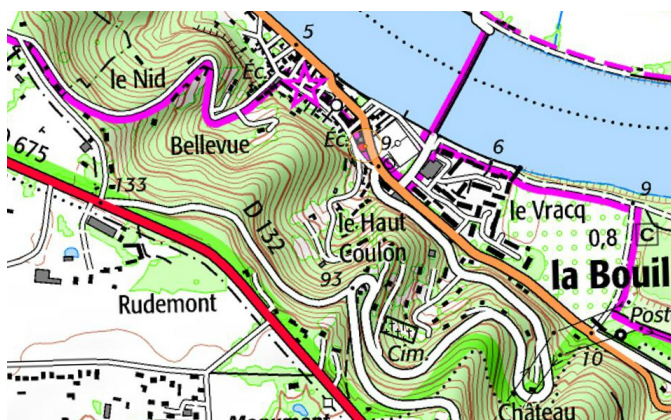
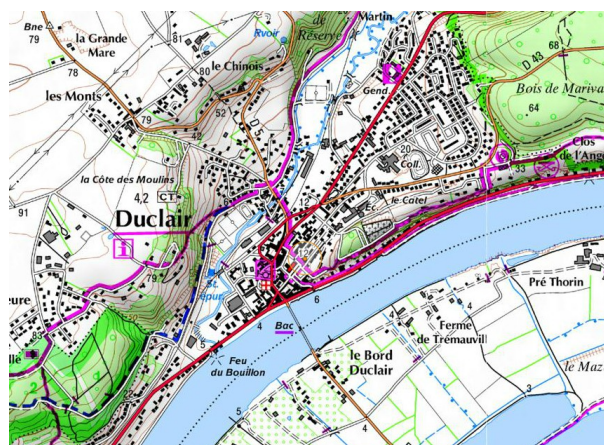
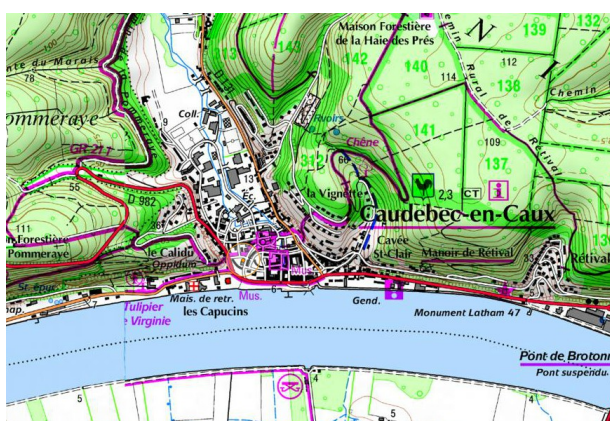
Quelque soit la situation du marégraphe, la durée des débordements et donc des volumes débordant est variable ; l'amplitude de cette variation étant elle aussi variable d'un marégraphe à l'autre (par exemple au maximum 4-5h sur Caudebec / de 0 à plus de 24h sur Elbeuf).

3.- La prévision des inondations sur le tronçon Seine aval

3.1.- Une situation simple : les secteurs à enjeux « coincés » entre la Seine et son coteau

Compte tenu de la forte densité du réseau de mesures existants, la méthodologie la plus simple à laquelle nous pensons est d'affecter à chaque lit majeur en rive droite et en rive gauche, ou val, un (ou des) marégraphe(s) de référence et de projeter la(les) cote(s) marine(s) maximum correspondante(s).

Cette méthodologie est immédiatement applicable pour certains secteurs urbanisés, où la projection des niveaux atteints au droit des marégraphes de référence aura tout son sens : il s'agit de secteurs constituant de « petits vals, exutoire d'affluents » (Caudebec, Duclair), ou de zones agglomérées situées à l'extrémité aval/amont de vals plus vastes (La Bouille, Oissel, Orival-Elbeuf). Des cartographies au 1/10 000 réalisées sur ces 5 secteurs et associées aux cotes marines des marégraphes de référence (il y en a un au droit de chacun de ces 5 secteurs !) pourront être rapidement établies.



Illustrations 10 à 13 : Caudebec-en-Caux sur la Ste Gerturde en rive droite, Duclair sur l'Austreberthe en rive droite de Seine, La Bouille en aval du val de Rouen RG, Oissel en amont du val de Rouen RG (de gauche à droite et de bas en haut), fonds SCAN25 ©IGN, sans échelle ici

L'application de cette méthodologie peut se généraliser à l'ensemble des rives de Seine où le lit mineur vient affleurer son coteau.

3.2.- Une logique de vals sur les autres secteurs

Sur les autres secteurs, la Seine successivement calée au pied de son coteau en rive droite ou en rive gauche, découvre 16 vals¹ d'étendues variables sur tout son linéaire, que nous avons nommés de la façon suivante :

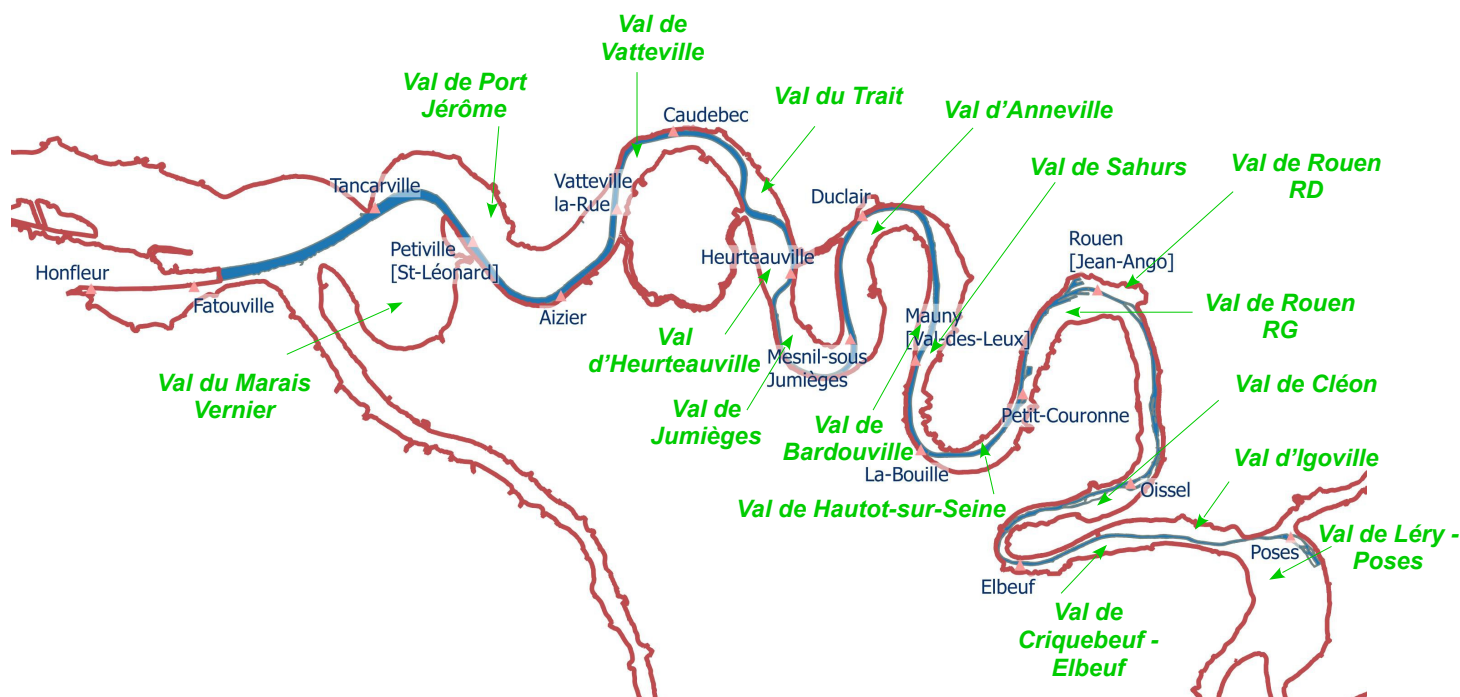


Illustration 14 : les marégraphes de Seine, l'enveloppe des zones inondées, et les différents « vals »

La mobilisation de ces vals et les écoulements qui peuvent s'y produire est difficile à appréhender. Compte tenue de la remontée de la « pleine mer » depuis l'aval, les premières zones potentielles de débordements se situent donc à l'aval de chaque val. Le positionnement de ces secteurs de mobilisation dépend cependant aussi de la topographie de la berge et des éventuelles murettes.

On peut distinguer :

- les vals « aval » (de Sahurs au Marais Vernier), qui ne présentent quasiment pas de pente longitudinale. Sur ces vals, on appréhende plutôt une mobilisation du lit majeur progressive avec le parcours du front d'onde, et une restitution vers le lit mineur via les cours d'eau (Le Commerce etc.) ou le réseau de drainage existant, au niveau de chacun des vals ;
- les vals de Rouen rive droite et rive gauche fortement urbanisés et remblayés en de nombreux secteurs nous semblent aussi difficilement être en mesure de générer un écoulement « longitudinal » (à plus forte raison s'ils sont effectivement mobilisés depuis l'aval) pour peu qu'ils présentent une pente longitudinale : on peut émettre l'hypothèse que les secteurs de mobilisations/restitutions se feront par une même frontière (là on l'on constate l'absence de berges « plus hautes » par rapport au lit majeur), en plus d'une restitution via le réseau eaux pluviales existant ;
- la situation des vals amont de Léry-Poses à Cléon est la plus complexe ; secteurs à faibles marnages

1 Pour reprendre une terminologie en usage sur la Loire.

lorsque l'on a affaire à une crue de la Seine, la mobilisation se faisant alors depuis l'amont, et ces mêmes vals présentant cette fois-ci une pente longitudinale, et aussi des axes secondaires d'écoulements marqués.

3.3.- Du val de Hautot-sur-Seine au val de Port Jérôme : une méthodologie de complexité progressive

Sur ces vals « aval », particulièrement étendus pour certains d'entre eux², à l'exception de ceux de Bardouville et d'Hautot-sur-Seine, la projection des cotes de pleine mer atteintes au droit des différents marégraphes n'est pas, comme on l'a vu, satisfaisante.

Nous proposons la méthodologie suivante.

- a) Pour peu qu'il existe, au droit de chaque val, une relation univoque entre les cotes établies sur le lit mineur, et que ces mêmes limnigrammes présentent une même forme (gradient de montée, tenue de plein etc.) quelque soit la situation modélisée, à la cote maximale prévue au(x) marégraphe(s) de référence, il sera possible d'associer un unique débit linéique d'alimentation du val via la détermination d'une loi de type « seuil » au niveau de la berge³.

La cartographie correspondante des aléas sur le val pourra ensuite être établie, pour chaque cote maximale prévue (par exemple avec un pas de 0,20 m) au(x) marégraphe(s) de référence, par :

- une simple « application » du volume débordant sur le val en question, ce qui permet de déterminer la cote du plan d'eau atteinte et les aléas (application d'une loi $V = f(z)$, $V(m^3)$, $z(m)$ cote du plan d'eau, propre à chaque val)⁴. Cette méthodologie suppose une connexion effective de l'ensemble des « zones basses », qui doivent pouvoir être effectivement toutes mobilisées ;
- un découpage du val en casiers en vue de tenir compte des mobilisations successives des zones basses par submersions progressives (loi de seuil) de l'ensemble des remblais existants : on répartira alors sur chaque « tranche » de berge le débit d'alimentation établi ;
- une modélisation 2D du val pour peu que celui-ci présente un fonctionnement hydraulique difficile à appréhender : le modèle pourra être alimenté (condition limite amont) avec les limnigrammes associés aux cotes maximales prévues sur le linéaire de berge concerné ;

- b) Si les hypothèses précédentes ne sont pas vérifiées (à savoir, au droit du val concerné, absence de relation univoque entre limnigrammes, et/ou forme des limnigrammes prévus variable en fonction des situations modélisées), il sera néanmoins possible de déterminer en « temps réel » le débit linéique d'alimentation du val, fonction, de façon approchée, comme on l'a vu, de la topographie berge/murette (loi de seuil).

Dans la situation où une simple application du volume débordant peut conduire à une cartographie des aléas sur le val concerné (1^{er} cas du a)), un jeu de cartes associée chacune à un « niveau » de volume ($10^x m^3 / 5.10^x m^3 / \dots$) pourrait être préalablement établi. En fonction du volume débordant prévu « en temps réel », il sera alors possible d'associer les cartes encadrant cette estimation.

Si la morphologie du val et son fonctionnement hydraulique (et la topographie des berges/murettes qui conditionne la localisation des secteurs d'alimentation) ne permettent pas cette simple « application » du volume débordant, seules des modélisations hydrauliques « en temps réel » (casiers ou 2D) permettraient alors de cartographier les aléas correspondant...

2 On notera aussi que sur certains vals, les zones urbanisées présentes peuvent constituer de véritables verrous et conditionner un découpage du val en deux zones distinctes fonctionnant indépendamment l'une de l'autre (cf. situation de Port Jérôme sur le val du même nom).

3 On dispose des relevés topographiques des murettes et crêtes de berges.

4 L'hypothèse est bien que cette cote atteinte est plus faible que les cotes prévues en lit mineur.

3.4.- Les vals de Rouen RD et RG

Si sur le val de Rouen rive droite, on peut espérer que la projection des cotes maximales susceptibles d'être atteintes, telle que présentée en 3.1. pourra permettre d'établir des cartes de prévisions des inondations, la situation de la rive gauche est plus complexe compte tenu de l'étendue du val, d'un secteur très urbanisé et remblayé, qui peut difficilement être modélisé sous forme de casiers mobilisés par une loi de seuil (le plus souvent absence de berges « hautes » présentant des zones en dépression à l'arrière).

Faute d'autre solution, et dans la mesure où une modélisation des écoulements dans le val de Rouen RG aurait très peu d'intérêt (secteur très urbanisé où les écoulements se font depuis le lit mineur et se restituent par la même frontière et le réseau eaux pluviales en Seine), nous suggérons, et quand bien même elle risque de conduire à une surévaluation de l'enveloppe de la zone inondée prévue, de projeter la ligne d'eau des maximum prévus sur ce même lit majeur (marégraphes de Oissel - Rouen - Petit Couronne - La Bouille).

On notera cependant l'absence de relation univoque entre les cotes observées au droit de ces 4 marégraphes. Aussi nous proposons de réaliser un découpage en 2 zones Oissel - Rouen / Rouen - La Bouille, dans la mesure où sur ce dernier tronçon une relation univoque est vraisemblable entre les 3 marégraphes concernés (à une cote prévue à l'un correspond une et une seule cote au droit de chacun des deux autres). Pour le tronçon Oissel - Rouen, un jeu de cartes combinant les deux cotes maximales attendues prévues, à l'image de ce qui est pratiqué dans les zones de confluences, pourrait être envisagé compte tenu de l'absence de relation univoque entre les limnigrammes de ces deux marégraphes.

3.5.- Les vals amont : d'Igoville à Cléon

Pour ces 3 vals⁵ (Igoville, Criquebeuf - Elbeuf, Cléon), et de façon « approchée », nous proposons ici aussi de projeter les lignes d'eaux des maximum prévus. Ces vals, de tailles réduites⁶, présentent en effet un même fonctionnement à dominante « fluviale » pour lequel les crues de Seine seront déterminantes (ce qui conduit, comme on l'a vu, à une forte tenue de plein, voire à la disparition du marnage), et aussi une vraisemblable relation univoque entre les 3 marégraphes présents : Oissel, Elbeuf et Poses. La cartographie pourra donc ici, a priori, être non spécifique à chaque val, et couvrir, comme « classiquement », les deux rives en suivant le linéaire de la Seine.

On sera vigilant comme dans le cadre de la méthodologie plus générale appliquée aux secteurs « fluviaux » à positionner les éventuelles lignes de contraintes déterminant une éventuelle mobilisation du lit majeur depuis un unique secteur et sans « écoulement » (= plan d'eau horizontal, secteur de débordement/restitution par une même frontière)⁷, et à veiller aussi à ce que l'ensemble des secteurs ainsi cartographiés soient effectivement connectés avec le lit mineur.

5 Nous mettons le val de Léry-Poses, qui cumule les difficultés, à part : secteur de confluence Eure-Seine + très vaste « lit majeur » où une digue (dépourvue d'EDD, et ne jouant clairement plus pleinement son rôle) sépare les lits majeurs respectifs de la Seine et de l'Eure + deux « fonctionnements » : fluvio-maritime et strictement fluvial (amont barrage de Poses).

6 Même si celui d'Igoville, au niveau de son secteur le plus large, présente une largeur de quasi 1 km, et donc un volume disponible important (même si celui-ci est déjà mobilisé de façon importante par les remblais entourant d'anciennes gravières).

7 Cf. entre autres, le remblai longitudinal le long de la ligne SNCF sur le val d'Igoville qui conduit à un tel fonctionnement pour le lit majeur situé à « l'arrière » de ce remblai.

4.- Mise en œuvre

La mise en œuvre des méthodologies présentées pourra débuter en 2016⁸ via la réalisation des cartographies présentées aux chapitres 3.1. (secteurs « coincés » entre la Seine et son coteau), 3.5. (vals amont : Cléon, Criquebeuf - Elbeuf, Igoville), puis 3.4. (les deux vals de Rouen), qui ne présentent pas, a priori, de difficultés particulières (sous réserve que les hypothèses avancées en 3.4. soient confirmées).

Celle présentée au chapitre 3.3., exploratoire et plus hasardeuse, ne pourra être qu'itérative, via le choix de vals à la complexité « progressive », et la vérification des hypothèses conditionnant le type de méthodologie à mettre en œuvre.

Enfin, les cartographies établies devront de façon indispensable, et en particulier sur ces mêmes secteurs (vals aval), être confrontées à des relevés de terrains (enveloppes de zones inondées constatées lors d'événements récents), qui sur la Seine, en particulier pour des événements de type « tempétueux » sur la partie aval du tronçon, ne sont pas si nombreux.

A Rouen, le 15 juillet 2015

André HÉBRARD et Stéphane PINEY, SRE/BHPC, DREAL Haute-Normandie

⁸ En 2014, réalisation des cartographies des tronçons Orne moyenne et aval (jusqu'au barrage Montalivet), en 2015, celles des tronçons Eure moyenne et aval (jusqu'à la commune de Louviers incluse).