

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

OBJECTIF C

RAPPORT FINAL V3

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

1.	CONTEXTE ET OBJECTIFS	1
1.1.	CONTEXTE GENERAL.....	1
1.2.	L'OBJECTIF C	2
1.3.	L'ESTUAIRE DE LA SEINE.....	2
1.4.	SYSTEMES DE REFERENCEMENT.....	3
2.	RECUEIL DES DONNEES	4
3.	LOGICIEL DE CALCUL ET SPECIFICITES DE LA METHODE « RIG »	6
3.1.	TELEMAC 2D	6
3.2.	METHODE DE CALCUL « RIG ».....	6
4.	CONSTRUCTION DU MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN	8
4.1.	DEFINITION DE L'EMPRISE GLOBALE DU MODELE.....	8
4.2.	DEFINITION DE L'EMPRISE DES DIFFERENTS SOUS MODELES.....	8
4.3.	ANALYSE ET TRAITEMENT DES DONNEES TOPOGRAPHIQUES ET BATHYMETRIQUES	10
4.4.	TRAITEMENT SPECIFIQUE DES INFRASTRUCTURES EN REMBLAI ET DES DIGUES	10
4.5.	TRAITEMENT SPECIFIQUE DU LIT MINEUR.....	11
4.5.1.	Traitement de la Seine fluviale.....	11
4.5.2.	Représentation de l'embouchure de la Seine et du domaine maritime	13
5.	MAILLAGE DU MODELE	14
6.	CALAGE ET VALIDATION DU MODELE	16
6.1.	EVENEMENTS DE CALAGE.....	16
6.2.	DONNEES DE CALAGE	18
6.3.	METHODOLOGIE	18
6.4.	PARAMETRES DU MODELE	19
6.4.1.	Forçages du modèle	19
6.4.2.	Conditions aux limites	19
6.4.3.	Paramètres de calage	20
6.5.	RESULTATS DU CALAGE.....	21
6.5.1.	Préalable	21
6.5.2.	Outils d'analyse du calage	22
6.5.3.	Événement 10 mars 2008	23
6.5.4.	Événement 21 mars 2008	23
6.5.5.	Événement 2010	24
6.5.6.	Événement 2001	24
6.5.7.	Événement 1995	25
6.5.8.	Événement 2013	25
6.5.9.	Événement de 2010 – Vent renforcé	25
6.6.	LIMITATIONS DU MODELE	28
7.	SYNTHESE ET CONCLUSIONS	29
	ANNEXE A Telemac2D	31

ANNEXE B	Modèle de la Manche	33
ANNEXE C	Modèle Numérique de Terrain	38
ANNEXE D	Résultats de calage	39

FIGURES

FIG. 1.	ZONE D'ETUDE	2
FIG. 2.	LOCALISATION DES MAREGRAPHES	4
FIG. 3.	EXEMPLE DE DONNEES TOPOGRAPHIQUES A L'AMONT DE ROUEN (AU NIVEAU DES COTEAUX DE TOURVILLE-LA-RIVIERE)	5
FIG. 4.	EXEMPLE DE DONNEES BATHYMETRIQUES AUX ENVIRONS D'OISSEL (ILE AUX BŒUFS)	5
FIG. 5.	SCHEMA DE PRINCIPE POUR LA PRISE EN COMPTE DES DIGUES DANS LE MODELE	7
FIG. 6.	EMPRISE GLOBALE DU MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN	8
FIG. 7.	EXEMPLE DE DECOUPAGE DE L'EMPRISE GLOBALE – EMBOUCHURE DE LA SEINE	9
FIG. 8.	EXEMPLE DE TRAITEMENT DE PROFIL EN TRAVERS – SIMPLIFICATION EN 8 POINTS	12
FIG. 9.	EXEMPLE DE TRAITEMENT DE PROFIL EN TRAVERS – SIMPLIFICATION EN 5 POINTS	12
FIG. 10.	MAILLAGE ET BATHYMETRIE AU VOISINAGE DE ROUEN	14
FIG. 11.	BATHYMETRIE DU MODELE	15
FIG. 12.	LIGNES D'EAU POUR LES EVENEMENTS DE CALAGE	17
FIG. 13.	METHODOLOGIE DE CALAGE	19
FIG. 14.	EMPRISE DU MODELE DE LA MANCHE	20
FIG. 15.	NIVEAUX D'EAU AU HAVRE (EN HAUT) ET A CAUDEBEC (EN BAS) PENDANT LA TEMPETE DE 2010 – RESULTATS DE CALAGE PROVISoire	21
FIG. 16.	CARTE DES COEFFICIENTS DE FROTTEMENT RETENUS	22
FIG. 17.	MAILLAGE DU MODELE DE LA MANCHE - ARTELIA.	34
FIG. 18.	CARACTERISTIQUES DE L'ONDE M2 EN AMPLITUDE ET EN PHASE	34
FIG. 19.	CARACTERISTIQUES DE L'ONDE M2 EN AMPLITUDE	35

TABLEAUX

TABL. 1 -	CARACTERISTIQUES DES EVENEMENTS DE CALAGE	17
TABL. 2 -	SURCOTES (CM), LIEES AUX VENTS, ET CALCULEES PAR LA MODELISATION	26
TABL. 3 -	COMPARAISON DES SURCOTES LIEES AU VENT EVALUEES PAR L'ANALYSE DES MESURES ET PAR MODELISATION	27
TABL. 4 -	COMPARAISON DES RESULTATS DU MODELE DE LA MANCHE « SOG V1.0 » AUX AUTRES MODELES PHYSIQUE (DE CH. LE PROVOST) ET MATHEMATIQUE (DE M. FORNEIRINO)	35
TABL. 5 -	RESULTATS DU MODELE DE LA MANCHE POUR L'ONDE M2 SUR L'ENSEMBLE DES MAREGRAPHES EN MANCHE DE DUREE D'ENREGISTREMENT SUPERIEUR A 1 AN	36
TABL. 6 -	ECARTS ENTRE LES RESULTATS DU MODELE DE LA MANCHE ET LES MESURES ISSUES DES 92 MAREGRAPHES DISPONIBLES EN MANCHE POUR L'ONDE DE MAREE M2	37

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

Objectif C

RAPPORT FINAL V3

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

3	Prise en compte des corrections	15/10/2013	F. Gandilhon / J. Schaguene	A. Masson
2	Version finale	24/09/2013	F. Gandilhon / J. Schaguene	A. Masson
1	Création du document	04/09/2013	F. Gandilhon / J. Schaguene	A. Masson
Indice	Objet de la modification	Date	Visa émetteur	Visa Qualité

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^e 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 C.

1.2. L'OBJECTIF C

L'objectif C de l'étude consiste à développer et caler un modèle hydraulique de l'estuaire de la Seine.

Ce modèle doit pouvoir représenter correctement les niveaux d'eau dans le lit mineur de la Seine à l'aval de Poses et les échanges en débit et en volume entre lit mineur et lit majeur. En revanche, ce modèle, en l'état, n'est pas conçu pour cartographier les zones inondables du lit majeur.

Le modèle développé prend donc en compte le lit mineur de la Seine (de l'île du Héron, sur la commune de Saint Pierre du Vauvray, à son embouchure, à 15km du Havre en baie de Seine) et le lit majeur de la Seine, soit l'ensemble de la plaine potentiellement inondable pour les événements extrêmes.

Cette étape se décompose en différents points :

- Recueil et traitement des données bathymétriques et topographiques ;
- Construction du modèle numérique de terrain ;
- Construction du fichier de digues et franchissements ;
- Calage du modèle sur différents événements marquants des vingt dernières années.

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 littorale et de la zone maritime proche.

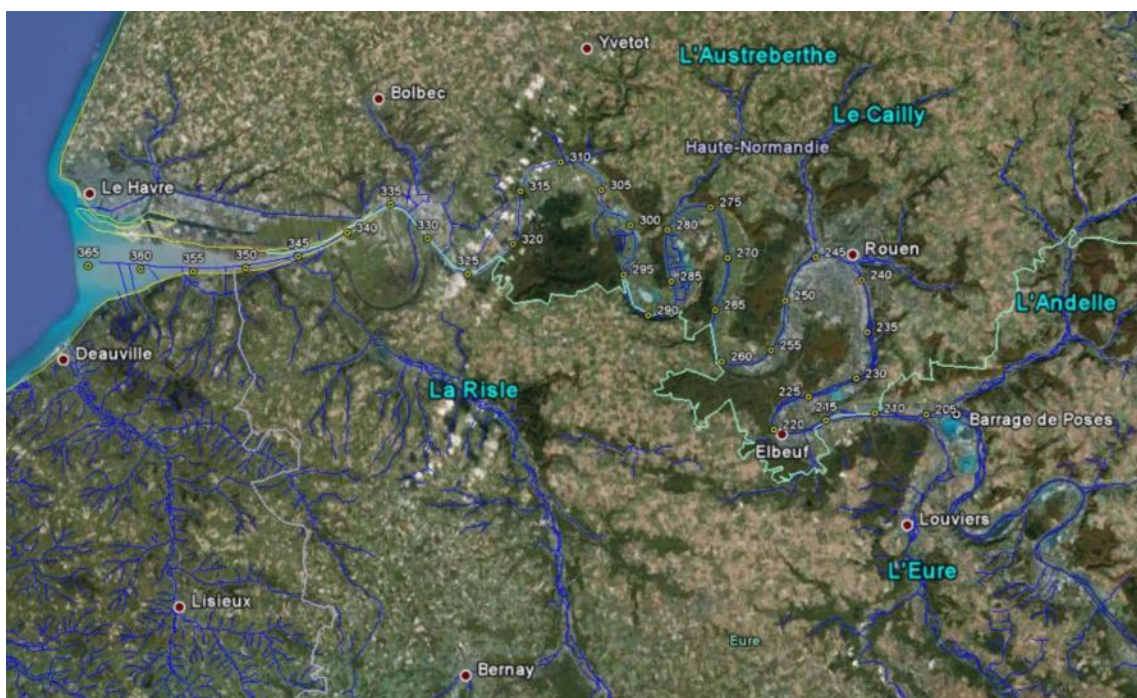


Fig. 1. Zone d'étude

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). Les pôles industriels de l'estuaire sont Rouen, Le Havre et Port Jérôme.

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. L'analyse de l'influence et de la période de retour de ces différents facteurs est disponible dans le rapport 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 » - Juillet 2013.

Depuis le XIX^e 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. SYSTEMES DE REFERENCEMENT

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 construction du modèle.

Le référencement planimétrique retenu est le système de projection RGF 93.

2. RECUEIL DES DONNEES

Certaines données ont été recueillies et analysées en détail au cours de l'objectif A de la présente étude (marée, vent, débit...). Seules les données utilisées dans la présente phase sont rappelées ci-après. D'autres données ont été utilisées plus spécifiquement au cours de l'objectif C.

Vents et Pression Atmosphérique :

- Données de Pression Atmosphérique au Havre (Météo France, 1986 à 2013) et à Rouen (Météo France, 2008 à 2013) ;
- Données de vent au Cap de la Hève - altitude/mer : 100m (Météo France, 1986 à 2013).

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,

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

Marées :

Les données de marée fournies par le Grand Port Maritime de Rouen représentent le signal complet de marée 2010 pour les 17 marégraphes de l'estuaire (localisés sur la Fig. 2) ainsi que pour le marégraphe du Havre et la balise A pour les périodes suivantes :

- 15 janvier au 15 février 1995 ;
- 13 mars au 13 avril 2001 ;
- 23 février au 23 mars 2008 ;
- Année 2010 ;
- 25 janvier au 25 février 2013.

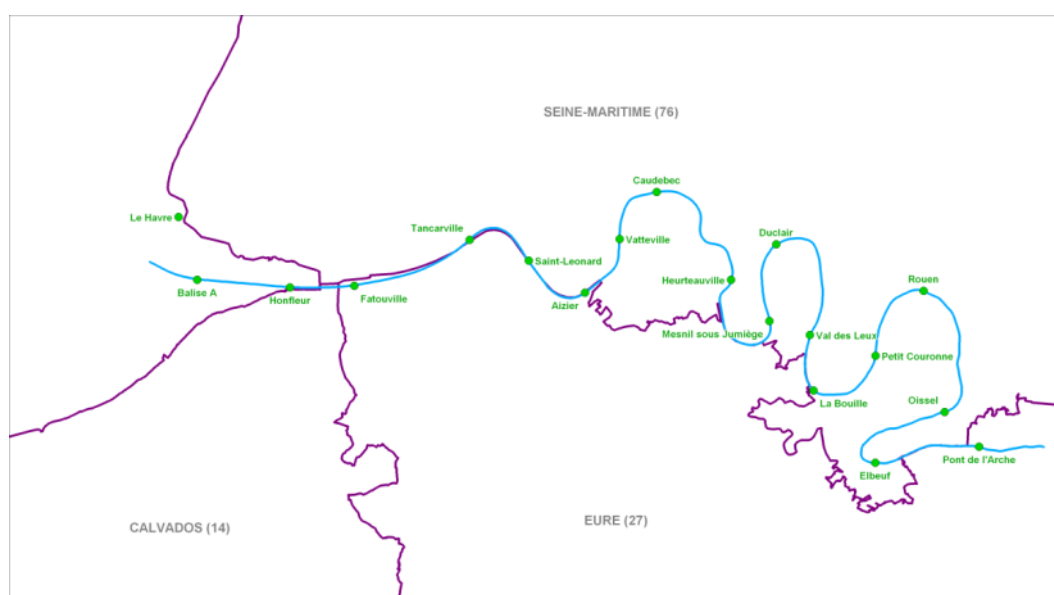


Fig. 2. Localisation des marégraphes

Topographie :

Les données topographiques dont nous disposons sont un levé LIDAR 2010-2011 (mené par le GIPSA) couvrant le lit majeur de l'estuaire de la Seine. Il s'agit d'un semis de points à haute résolution obtenu par laser aéroporté, référencé selon des numéros de dalles, allégé au niveau des pentes nulles à faibles, au maximum jusqu'à 30 m de distance, et très dense au niveau des ruptures de pente, au minimum jusqu'à 0,1 m de distance (Fig. 3). Ces données brutes sont référencées en m IGN69.

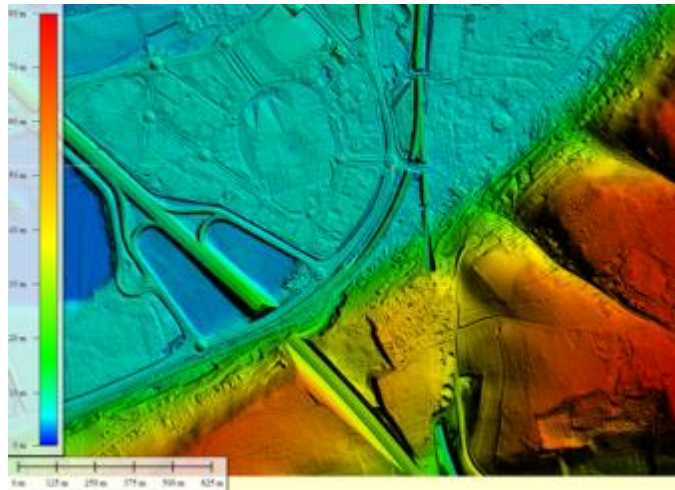


Fig. 3. Exemple de données topographiques à l'amont de Rouen (au niveau des coteaux de Tourville-la-Rivière)

Bathymétrie :

Les données bathymétriques sont fournies sous forme de grilles régulières avec une résolution de 1m (Fig. 4). Il s'agit d'une jointure entre les données bathymétriques récentes couvrant le secteur d'étude (source : Grand Port Maritime de Rouen et Grand Port Maritime du Havre) et les données topographiques couvrant les berges et les digues de la Seine-aval (levé LIDAR, 2010-2011). Les données brutes sont géo référencées en m CMH.

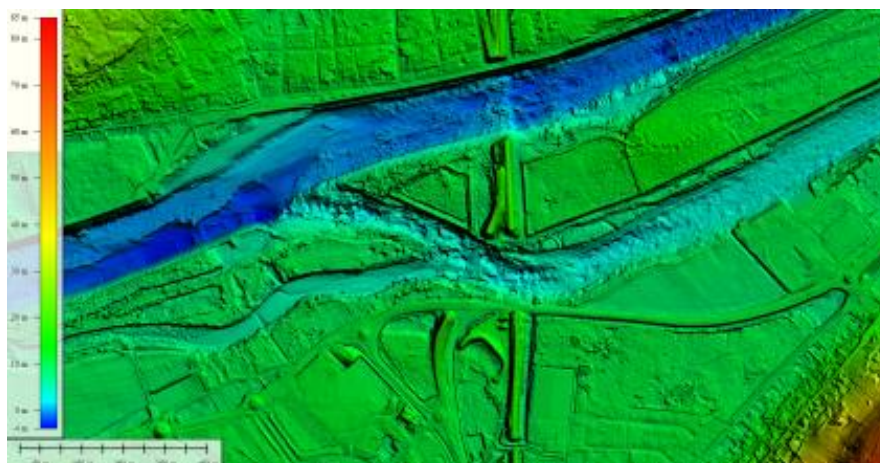


Fig. 4. Exemple de données bathymétriques aux environs d'Oissel (île aux Bœufs)

3. LOGICIEL DE CALCUL ET SPECIFICITES DE LA METHODE « RIG »

3.1. TELEMAC 2D

Pour répondre à la problématique posée et à la vue des paramètres qui influent sur les niveaux d'eau dans l'estuaire (débit, remontée de la marée, gonflement lié au vent, pression atmosphérique), une modélisation bidimensionnelle a été mise en œuvre.

Le système de modélisation utilisé est la chaîne aux éléments finis TELEMAC développé par EDF-R&D en respect des procédures d'Assurance de la Qualité des Logiciels Scientifiques et Techniques d'EDF-R&D. Ce système regroupe un ensemble de logiciels basés sur la technique des éléments finis, dédiés aux problèmes de mécanique des fluides environnementaux. Il est adapté à la simulation et à l'étude détaillée des courants et des niveaux induits par la marée, les débits des rivières, les vents...

L'intérêt d'utiliser une technique aux éléments finis est de représenter le terrain (bathymétrie, faibles fonds, ...) et les aménagements portuaires (quais, digues, ...) par un assemblage de facettes triangulaires de taille et de forme variables, nommé « maillage ». Ainsi il est possible d'affiner localement la précision du modèle en fonction des objectifs de l'étude, notamment au sein du lit mineur.

Le logiciel TELEMAC-2D a plus particulièrement été utilisé. Il résout, par une méthode aux éléments finis sur des maillages triangulaires, les équations de Barré Saint-Venant (1871) à deux dimensions d'espace horizontales obtenues par simplification des équations de Navier-Stokes. En chaque point du maillage, les principaux résultats en sortie du modèle sont la hauteur d'eau, et les vitesses horizontales moyennées sur la verticale (cf. Annexe A pour plus de précision).

3.2. METHODE DE CALCUL « RIG »

A l'utilisation du logiciel TELEMAC-2D s'ajoute l'utilisation d'une méthodologie spécifique de prise en compte des digues et des infrastructures en remblai. L'outil-modèle « RIG » (Référentiel Inondation Gironde) est ainsi appliqué : il s'agit d'une méthode innovante, développée par ARTELIA dans le cadre de l'étude « Elaboration d'un référentiel de protection contre les inondations sur l'estuaire de la Gironde ».

Le principe de la méthode « RIG » utilisée ici repose sur une externalisation du traitement des digues et des infrastructures en remblais : celles-ci sont considérées comme une singularité en dehors du modèle et répondent à des lois hydrauliques :

- En seuil dénoyé : $Q = \mu L \sqrt{2g} (Cote\ amont - Cote\ seuil)^{\frac{3}{2}}$
- En seuil noyé : $Q = \frac{1}{\frac{2}{3}\sqrt{\frac{1}{3}}}\mu L \sqrt{2g} (Cote\ amont - Cote\ seuil)^{\frac{3}{2}}$

avec Q le débit, μ le coefficient de débit qui varie entre 0,32 et 0,5 selon la forme de la crête de seuil et selon la charge sur le seuil, L la longueur du seuil et g la constante de gravité.

La Fig. 5 présente un schéma de comparaison entre l'approche « RIG » (à gauche) et l'approche classique (à droite) pour représenter une digue entre lit mineur et lit majeur.

La méthode classique de représentation des écoulements sur une digue par maillage contient un nombre de points plus important et nécessite un maillage plus fin au niveau des crêtes de digue. Elle

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

Objectif C

RAPPORT FINAL V3

contient cependant moins d'informations sur la crête de digue étant donné que la projection sur le maillage est plus distendue, la description altimétrique de la digue se faisant uniquement par les nœuds du maillage.

La méthode « RIG » fonctionne par correspondance point par point du maillage de part et d'autre de la digue, mais tient compte d'une description altimétrique de la digue à une échelle plus détaillée que celle du maillage. Les digues sont alors représentées comme des « coupures » dans le maillage.

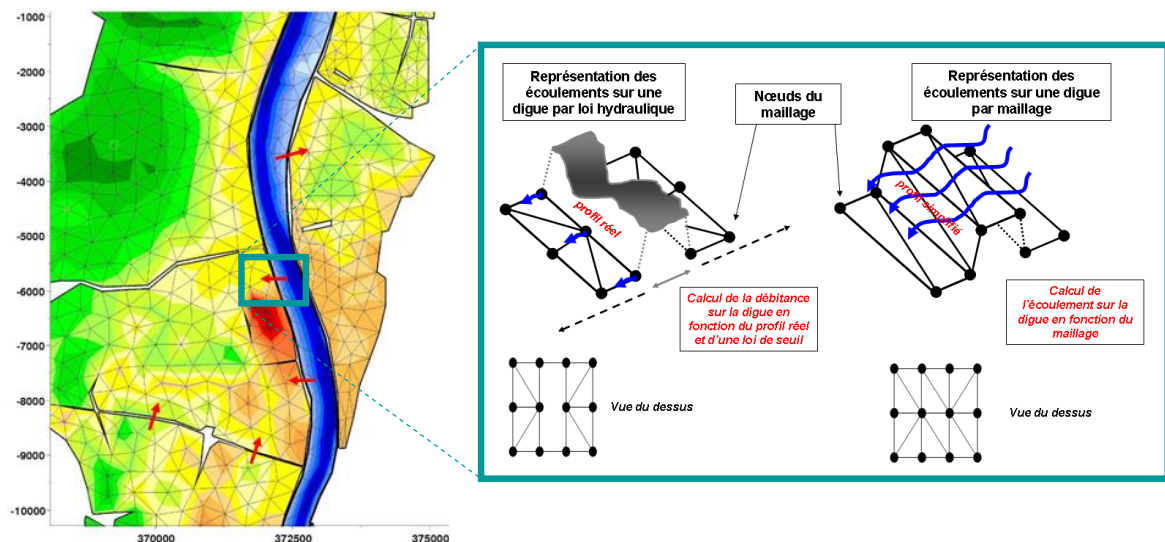


Fig. 5. Schéma de principe pour la prise en compte des digues dans le modèle

De même, au sein même du lit majeur, la méthode « RIG » peut être appliquée pour représenter les écoulements sur les infrastructures en remblai (routes en remblais, voies ferrées, autoroutes, etc...) par loi hydraulique et non pas par maillage, ce qui permet un gain non négligeable en terme de temps de calcul. Par conséquent, des sous-modèles sont délimités de part et d'autre de ces infrastructures et des ruptures de pentes naturelles.

D'autre part, au sein du lit mineur, outre la représentation de la digue et des murets anti-inondation, la méthode « RIG » est également employée dans d'autres cas ; par exemple, au niveau des ouvrages maritimes (digue basse Nord, digue du Ratier, Epi en fosse Nord).

4. CONSTRUCTION DU MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN

4.1. DEFINITION DE L'EMPRISE GLOBALE DU MODELE

L'emprise globale du modèle est définie comme suit :

- A l'amont, la Seine est représentée jusqu'à l'île du Héron, sur la commune de Saint Pierre du Vauvray ;
- A l'aval, une partie de la baie de Seine est représentée, s'étendant à environ 15 km à l'Ouest et 15 km au Nord du Havre ;
- Latéralement, l'ensemble de la plaine potentiellement inondable pour les événements extrêmes est représentée, c'est-à-dire jusqu'aux pieds des versants marqués et identifiés sur les cartes topographiques IGN au 1/25 000^e ;
- Le barrage de Poses, inclus dans le modèle, est considéré comme une singularité bathymétrique. Il n'est pas apporté de gestion particulière à cet ouvrage car seuls les événements extrêmes sont étudiés ; le barrage est donc considéré comme transparent.

Au total, le modèle numérique de terrain de l'estuaire de la Seine couvre un linéaire d'environ 175 km et une superficie de 1000 km². La Fig. 6 donne un aperçu de l'emprise globale du modèle.

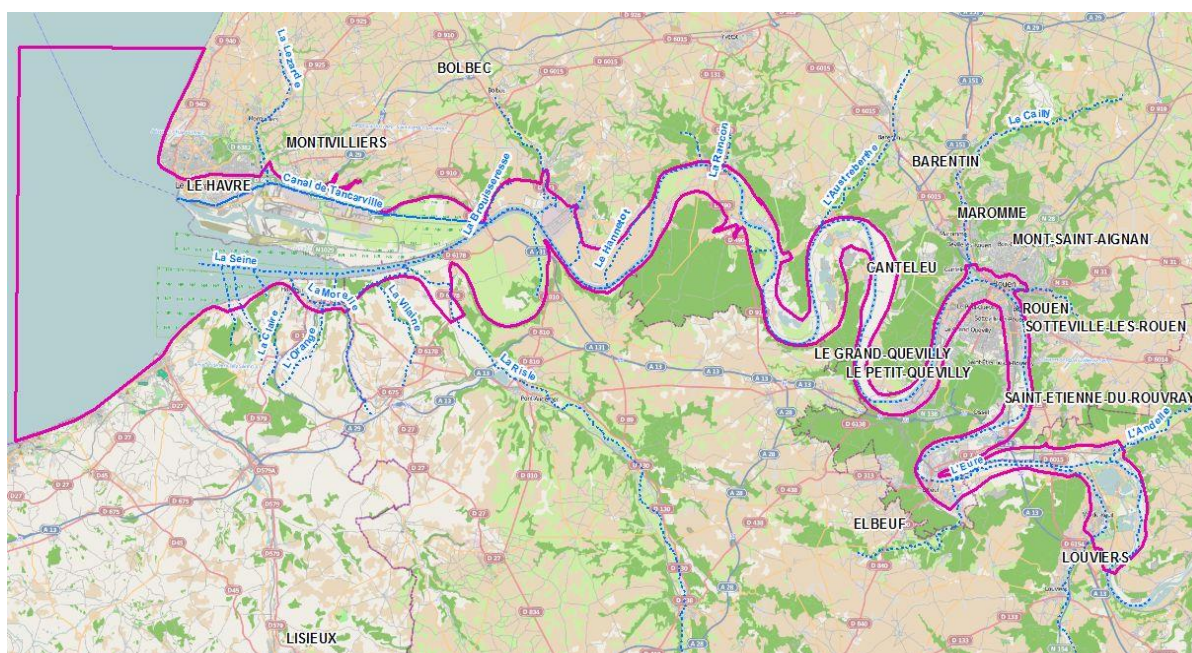


Fig. 6. Emprise globale du modèle numérique de terrain

4.2. DEFINITION DE L'EMPRISE DES DIFFERENTS SOUS MODELES

Conformément à la méthode décrite au paragraphe 3.2, l'emprise globale définie au paragraphe 4.1 est divisée en un ensemble de sous modèles, qui seront amenés à communiquer entre eux au cours du calcul, sous la forme de flux transitant par les ouvrages/infrastructures les délimitant.

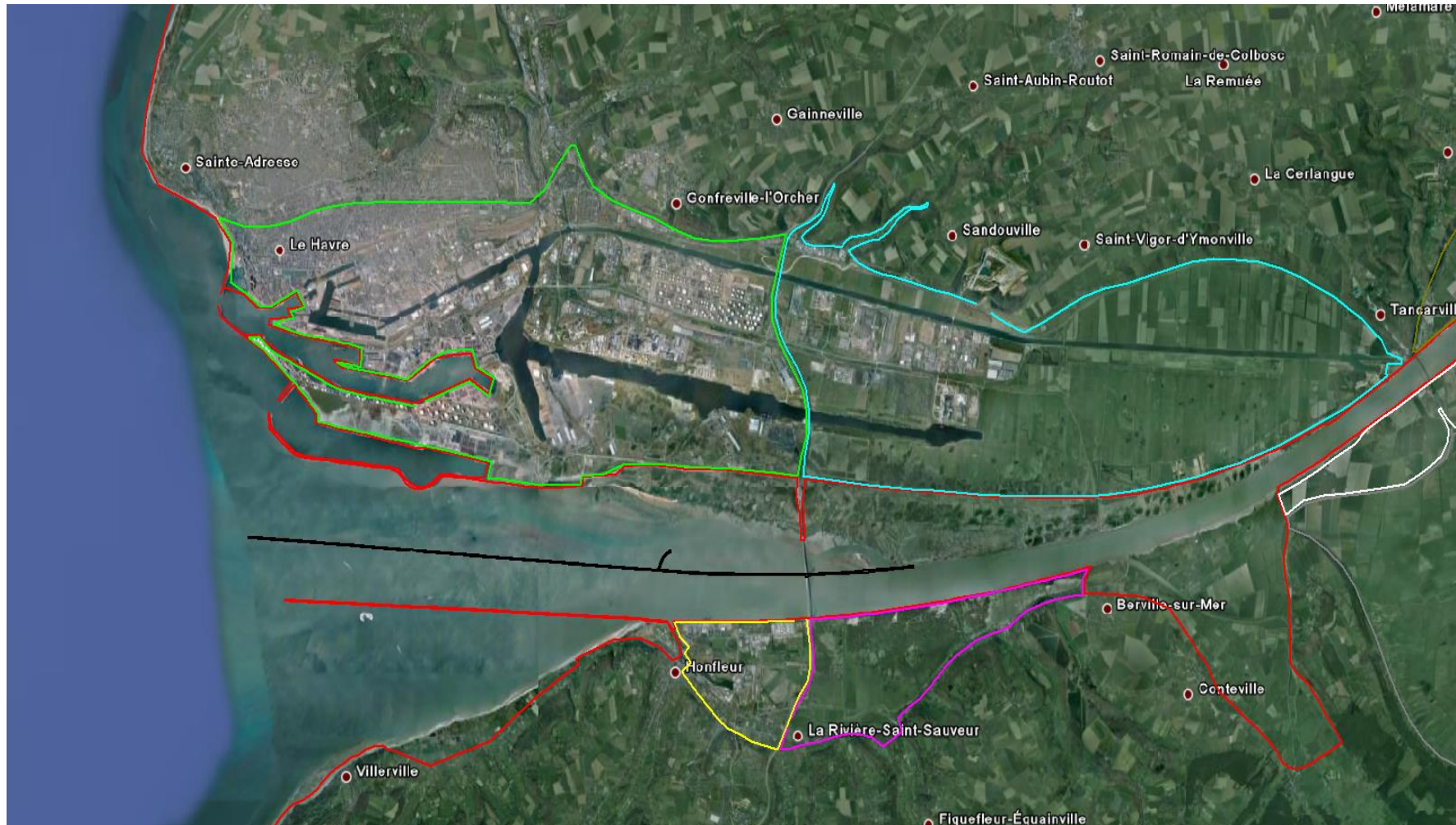


Fig. 7. Exemple de découpage de l'emprise globale – Embouchure de la Seine

Concrètement, chaque fois qu'une ligne de contrainte doit être tracée pour représenter un ouvrage de franchissement (type route avec remblais, voies ferrées, digues, etc.), deux sous-modèles sont créés de part et d'autre. La limite des sous-modèles est définie jusqu'au pied de l'ouvrage de franchissement.

A titre d'exemple, la Fig. 7 montre le découpage de l'embouchure de la Seine en sous modèles :

- L'emprise rouge correspond au sous modèle « lit mineur » du modèle. Elle englobe la partie maritime du modèle, le lit mineur de la Seine, les bassins portuaires ainsi que la fosse Nord et sa vasière associée. Elle englobe également la zone de confluence avec la Risle et les prairies alentours, ces dernières n'étant pas physiquement séparées du lit mineur par une digue ou un muret. De même, la partie Ouest de la ville de Honfleur est reliée directement au lit mineur par une plage, d'où son intégration dans cette emprise. Les marais à proximité de Villerville sont intégrés au lit mineur pour la même raison.
- L'emprise jaune correspond à la partie Est de la Ville de Honfleur. Les éléments ayant permis sa définition sont : au Nord par les quais sur la Seine, à l'Ouest par le port de Honfleur, au Sud par la limite topographique de l'emprise globale, et à l'Est par le remblai de l'autoroute A29.
- L'emprise verte correspond à la ville du Havre. Elle est définie en majorité par les quais et écluse du port, mais également par la route de l'estuaire et l'autoroute.
- L'emprise bleue contient les marais à l'Est du Havre, ainsi que le canal de Tancarville. Elle est délimitée au Nord par l'autoroute A131, au Sud par la route de l'estuaire, et à l'Ouest par l'autoroute A29.
- La digue basse Nord et l'Epi, en noir sur la figure, sont également considérés comme des singularités. Ils sont donc représentés comme des « îles » dans le modèle du lit mineur. Les surverses sur ces deux ouvrages sont externalisées grâce à la méthode « RIG », au même titre que les surverses sur la digue du Ratier.
- L'emprise rose correspond aux bois et prés à l'Est de Honfleur. Elle est définie par l'autoroute A29 à l'Ouest, la digue sur la Seine au Nord et la route départementale au Sud.

La délimitation de l'ensemble des sous modèles est disponible en Annexe C (figures 3 à 6).

4.3. ANALYSE ET TRAITEMENT DES DONNEES TOPOGRAPHIQUES ET BATHYMETRIQUES

Les données topographiques brutes ont été analysées afin de ne conserver que les données nécessaires à la construction du modèle numérique de terrain. Ces données brutes ont été interpolées sur une grille régulière avec un pas d'espace de 10m. Cette taille de cellules permet d'avoir le degré de résolution souhaitable pour conserver les informations de topographie. Cette grille est utilisée ultérieurement pour coter l'ensemble des nœuds du maillage du lit majeur.

Une grille plus fine avec un pas d'espace de 1m a été établie localement au niveau des digues et des infrastructures en remblai (traitées via la méthode « RIG ») afin de prendre en compte précisément la cote de la crête de ces singularités (cf. chapitre 4.4).

4.4. TRAITEMENT SPECIFIQUE DES INFRASTRUCTURES EN REMBLAI ET DES DIGUES

La prise en compte des singularités entre les sous modèles par la méthode « RIG », basée sur une externalisation, nécessite de disposer de polygones composées de points cotés entre les différents

sous-modèles (cf. chapitre 3.2) : en chacun de ces points, un tronçon de digue est associé et cumule le débit total transitant par-dessus celui-ci.

A partir des données topographiques (LIDAR) et de la cote des murets anti inondation, une polyligne représentant la digue entre le lit mineur et le lit majeur sur tout le linéaire de la Seine en rive gauche et en rive droite a été tracée et cotée (cotes des murets anti inondation ou crête de la digue selon les endroits) avec une précision accrue (erreur < 5cm).

Par ailleurs, il en a été fait de même pour les infrastructures en remblai et les ouvrages de franchissement au sein même du lit majeur et du lit mineur.

4.5. TRAITEMENT SPECIFIQUE DU LIT MINEUR

4.5.1. Traitement de la Seine fluviale

Dans l'optique de respecter des temps de calcul raisonnables, le raffinement du maillage du lit mineur de la Seine peut être optimisé de manière à réduire fortement le nombre de nœuds sur les 160km séparant Saint-Pierre-de-Vauvray et Berville-sur-Mer, sans que cela se répercute sur les résultats attendus. En effet, cela permet d'obtenir une propagation correcte de la marée tout en ayant des niveaux d'eau correspondant aux observations.

Cette simplification du maillage passe par un lourd travail de schématisation des sections en travers du lit mineur à l'aide de seulement quelques nœuds placés à intervalles réguliers. Il n'est plus possible d'effectuer une interpolation directe sur la bathymétrie et seul un travail manuel de simplification des sections permet d'être représentatif.

Une section en travers tous les 125 mètres est ainsi extraite de la mosaïque bathymétrique sur le linéaire séparant Saint-Pierre-de-Vauvray de Berville-sur-Mer.

Chaque section, représentée par un nombre fixe de points, devra être hydrauliquement comparable à la section réelle. Ce respect hydraulique passe par l'application de deux critères clefs :

- La cote du point le plus bas dans le chenal doit être respectée pour représenter la pente réelle longitudinalement, ce qui est crucial en étiage ;
- La section sous une cote de référence (cote moyenne à la section sur un cycle de marée pour un débit moyen de la Seine) toujours en eau doit être respectée à moins de 1 % près.

Le nombre de points définissant chaque section varie le long de l'estuaire en fonction de sa largeur de manière à ce que deux points soient espacés transversalement d'une distance comprise entre 40 et 150 mètres selon la largeur du lit au droit de la section concernée. La Fig. 8 montre une section simplifiée en 8 points, au voisinage de Tancarville, et la Fig. 9 une section simplifiée en 5 points, à l'amont de Rouen.

Finalement, sur l'ensemble du lit mineur entre Saint Pierre de Vauvray et Berville-sur-mer, un total d'environ 1400 sections est ainsi schématisé.

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

Objectif C

RAPPORT FINAL V3

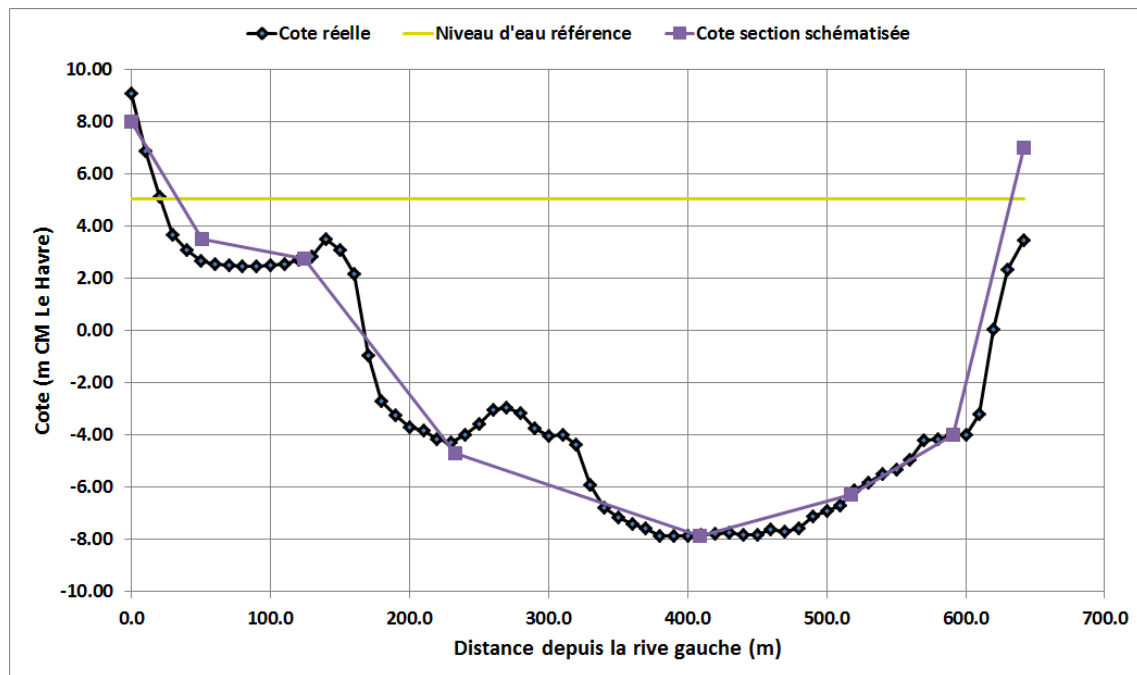


Fig. 8. Exemple de traitement de profil en travers – Simplification en 8 points

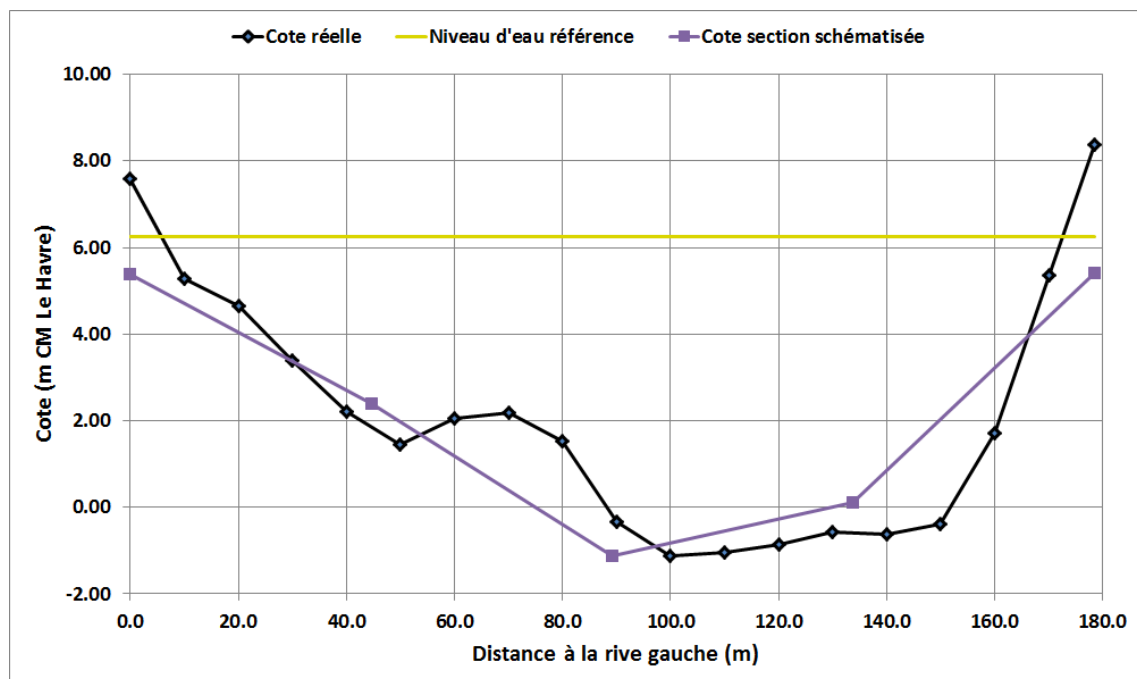


Fig. 9. Exemple de traitement de profil en travers – Simplification en 5 points

Une fois l'ensemble des profils schématisés, chaque point de chaque section est alors relié à son point correspondant sur le profil précédent et le profil suivant.

Des lignes longitudinales sont ainsi construites dans le sens de l'écoulement puis des points bathymétriques sont créés sur ces lignes par interpolation de la bathymétrie se trouvant à l'intersection de ces lignes et des profils en travers.

4.5.2. Représentation de l'embouchure de la Seine et du domaine maritime

L'embouchure de la Seine présente des singularités sous la forme de digues semi immergées : la digue basse Nord, la digue du Ratier, et l'Epi en fosse Nord. Le traitement de ces digues est externalisé grâce à l'utilisation de la méthode « RIG », ces dernières sont donc représentées sous la forme d'îles dans le modèle, et sont visibles sur la Fig. 7 (en noir pour la digue basse Nord et l'Epi, en rouge pour la digue du Ratier).

La fosse Nord est discrétisée à l'aide de mailles régulières d'une centaine de mètres en moyenne, pouvant descendre à une cinquantaine de mètres à l'approche du chenal environnemental. Une taille de maille similaire est appliquée au chenal de la Seine, ainsi qu'à la fosse Sud.

A partir de l'extrémité Ouest de la digue basse Nord, la taille des mailles est progressivement augmentée pour atteindre 2km à la frontière maritime du modèle.

5. MAILLAGE DU MODELE

Les sous modèles sont maillés indépendamment les uns des autres. Puis à l'image d'un puzzle, tous les sous modèles sont assemblés dans un unique maillage. La taille de maille varie selon les zones du modèle, le but étant d'avoir un nombre de nœuds de calcul acceptable qui permet à la fois de représenter correctement la topographie et la bathymétrie du terrain naturel et de garder des temps de calcul raisonnables.

Le maillage du lit mineur est le plus raffiné. La taille de maille est d'environ 125m longitudinalement afin de représenter correctement les écoulements selon la direction principale.

Pour le lit majeur, les critères de maille sont compris entre 150 m et 500 m, variables selon la forme et la situation du sous-modèle. Cette taille de maille peut paraître assez élevée mais il est important de rappeler que l'objectif de l'étude est de déterminer les volumes transitant dans ces zones lors des débordements du lit mineur et non de livrer une cartographie précise des zones inondables. Il n'est donc pas nécessaire de représenter avec une précision accrue la topographie du terrain dans le lit majeur.

De même, la topographie disponible en lit majeur présente la cote de surface des différents canaux et étangs. Par conséquent, dans les zones de canaux (comme le canal de Tancarville), ou d'étangs (comme l'étang des Deux Amants à proximité de Poses), la bathymétrie du modèle n'est pas représentative de la bathymétrie réelle, mais de la cote de surface de l'eau au moment des levés.

Au total, le modèle se compose d'environ 23 000 nœuds de calcul dont environ 16 000 nœuds uniquement dans le lit mineur.

La Fig. 10 présente le maillage au voisinage de Rouen. D'autres zooms du maillage sont disponibles en Annexe C Figures 8 à 11.

La Fig. 11 propose un aperçu général du modèle et de sa bathymétrie. Les fonds évoluent entre -20m CMH à l'extrémité maritime du modèle et environ 20m CMH au Nord du barrage de Poses

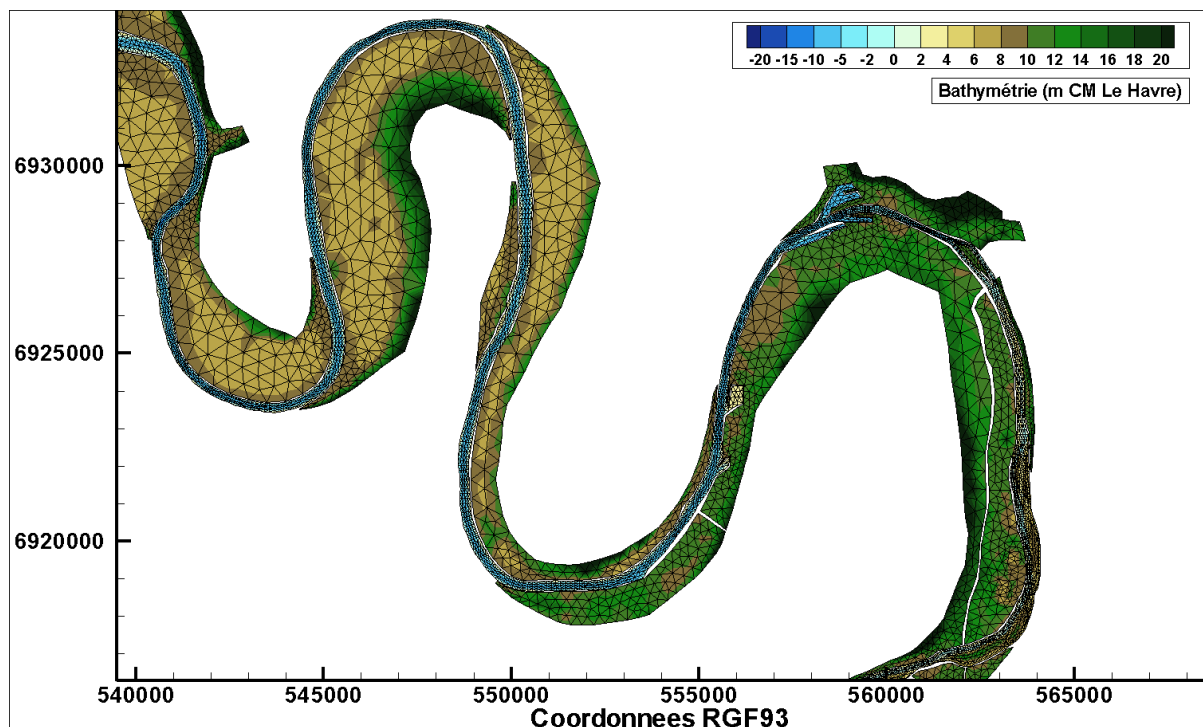


Fig. 10. Maillage et bathymétrie au voisinage de Rouen

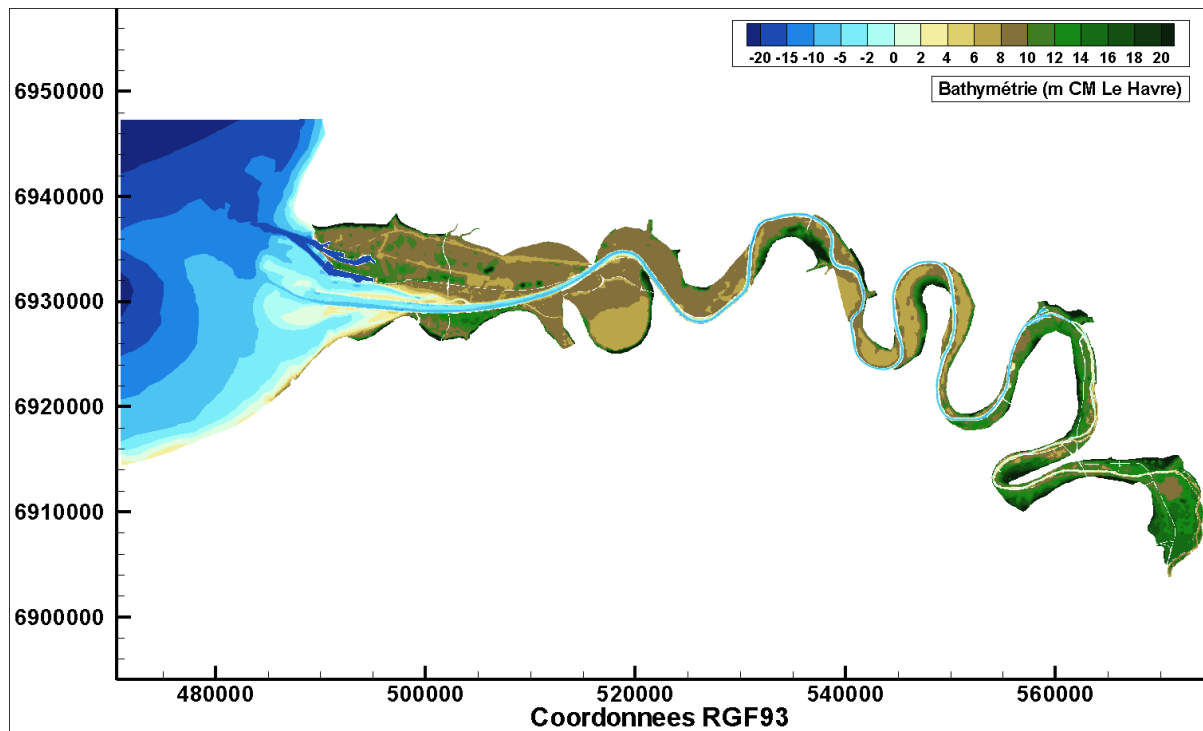


Fig. 11. Bathymétrie du modèle

6. CALAGE ET VALIDATION DU MODELE

6.1. EVENEMENTS DE CALAGE

Suite à l'analyse des événements historiques au cours de l'objectif A, quatre événements de calage ont été initialement retenus ; puis deux autres événements ont été rajoutés au cours du calage :

- L'événement de **1995** : 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 m³/s à Poses.
- L'événement de **2001** : plutôt de type fluvial, il résulte de la combinaison de divers paramètres : Débit élevé (2280 m³/s à Poses), forte dépression (996 hPa), vents de secteur sud/sud-ouest de 29km/h. Le coefficient de marée associé est de 89. Cette crue du même type que celle de 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 1995 (Fig. 12).
- L'événement du 10 mars **2008** (noté par la suite événement 2008-[1]) : cet événement, de caractère maritime 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. Le débit de la Seine, plutôt faible à Poses (579 m³/s), n'a joué aucun rôle significatif.
- L'événement du 21 mars **2008** (noté par la suite événement 2008-[2]) : événement de type maritime, combinant une marée de vive eau exceptionnelle (coefficient 105), un vent de 72km/h, et un débit important de 929 m³/s à Poses. Cet événement nous permis de valider notre modèle à l'aval pour un vent d'Ouest.
- L'événement de **2010** (tempête « Xynthia ») : c'est un phénomène de type maritime du même type que celui 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 m³/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 2008 (Fig. 12). A noter la valeur à Aizier relativement basse pour l'événement considéré comparativement aux autres relevés à l'aval de l'estuaire.
- L'événement de **2013** : événement de type fluvial, résultant de la combinaison d'un débit élevé (1600 m³/s à Poses) et d'une marée de vive eau exceptionnelle (coefficient 106). Cet événement fluvial plus proche chronologiquement du modèle développé (présence de « Port 2000 », bathymétrie et topographie plus cohérentes) a été utilisé afin de valider notre modèle en particulier à l'amont de l'estuaire.

Deux événements (1995 et 2001) sont antérieurs à l'aménagement de « Port 2000 » et quatre événements postérieurs (2008-[1], 2008-[2], 2010 et 2013). Les données topographiques et bathymétriques utilisées sont datées d'après 2006 et un unique modèle contenant l'aménagement « Port 2000 » est utilisé.

Parmi les événements choisis, trois événements sont de type maritime (2008 [1] et [2] ; ainsi que 2010) et ont un impact plutôt sur l'aval de l'estuaire, deux événement sont de type fluvial (2001 et 2013) et impactent plutôt les niveaux à l'amont de l'estuaire et enfin le dernier événement, de type fluvio-maritime (1995), joue un rôle sur la majorité de l'estuaire.

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

Objectif C

RAPPORT FINAL V3

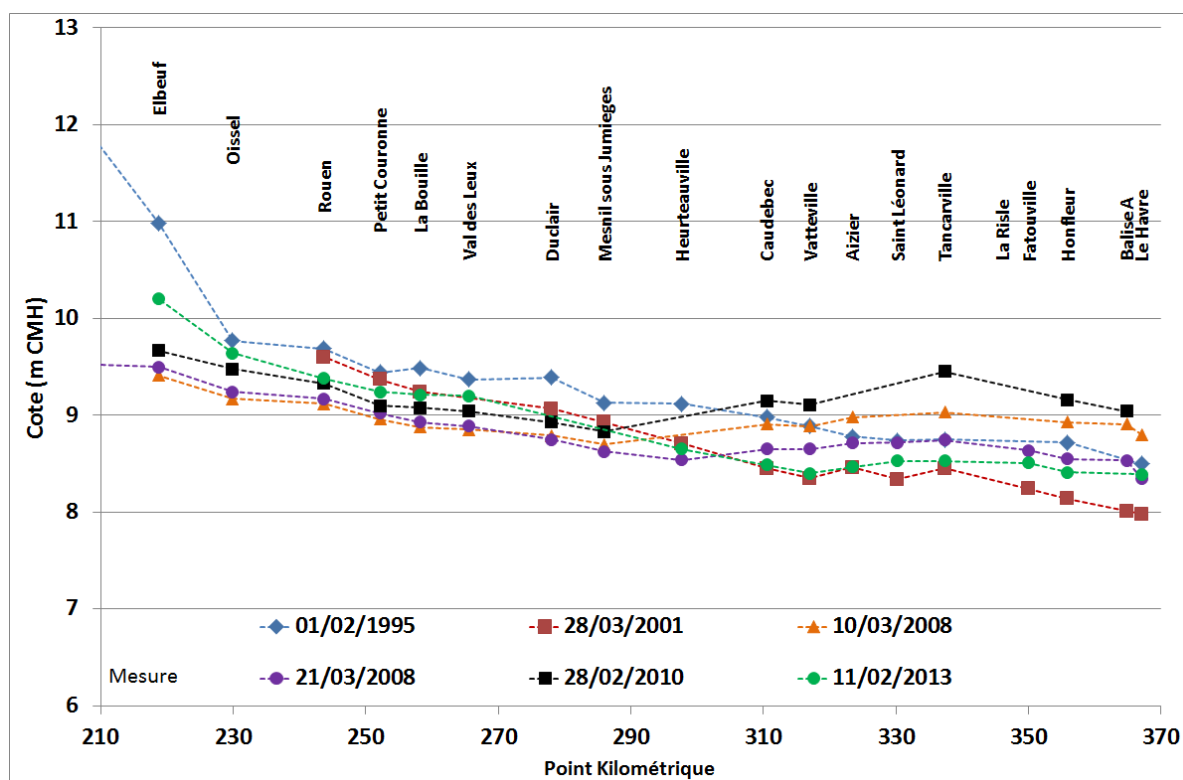


Fig. 12. Lignes d'eau pour les événements de calage

Le Tabl. 1 - récapitule les différentes caractéristiques de ces événements.

Tabl. 1 - Caractéristiques des événements de calage

	Evénements					
	1995	2001	2008 10 mars	2008 21 mars	2010	2013
PARAMETRES	Crue	Crue	Tempête	Tempête	Tempête	Crue
Débit max à Poses (m^3/s)	2080	2280	579	929	800	1600
Coefficient de marée	104	89	106	105	102	106
Vent max au Cap de la Hève (km/h)	65	54	95	72	50	20
Direction du vent	Sud-ouest	Sud-sud-ouest	Sud-ouest	Ouest	Ouest-nord-ouest	Nord-nord-ouest
Niveau d'eau maximal à Rouen (m CMH)	9,69	9,60	9,12	9,17	9,33	9,38
Niveau d'eau maximal au Havre (m CMH)	8,5	7,98	8,80	8,35	NC	8,39

6.2. DONNEES DE CALAGE

Les données disponibles pour caler notre modèle correspondent aux niveaux d'eau mesurés aux 17 marégraphes le long de l'estuaire ainsi qu'à la Balise A et au Havre. Ces données sont disponibles temporellement autour de chaque événement.

Les niveaux d'eau maximums atteints pour chaque événement sont également disponibles le long de l'estuaire.

6.3. METHODOLOGIE

La phase de calage consiste à reproduire le plus fidèlement possible la propagation de la marée et d'une crue dans l'estuaire de la Seine, en ajustant certains paramètres tels que la rugosité du terrain (coefficient de Strickler dans notre cas).

Plus précisément, les surfaces libres issues des marégraphes sont comparées avec les données obtenues en sortie du modèle. Le niveau de pleine mer est la partie du cycle de la marée essentielle à caler. En effet, l'objectif de cette étude est de modéliser les niveaux d'eau et les volumes pouvant déborder et transiter dans le lit majeur lors d'événements extrêmes. Représenter avec exactitude les niveaux de basse mer n'est donc pas prioritaire pour la gestion du risque inondation et n'est donc pas le but premier de cette phase de calage.

En pratique, un premier événement de calage est simulé avec un jeu de paramètres fixé ; les résultats obtenus avec cette simulation sont comparés aux mesures. La simulation suivante tient compte de l'analyse de l'écart entre les données du modèle et les données mesurées et s'effectue avec un nouveau jeu de paramètres susceptible de diminuer cet écart. Le jeu de paramètres est modifié de façon à ce que l'écart soit minimisé. Le modèle numérique est calé par zones selon la position des différents marégraphes en partant de l'aval de l'estuaire et en remontant jusqu'à l'amont.

L'écart admissible entre les données de la simulation et les données de la mesure a été choisi à 0,1m. Différents indicateurs sont utilisés pour évaluer la précision du calage. Ces indicateurs sont définis en Annexe D – Figure 5.

La phase de validation permet de confirmer les paramètres déterminés lors de la phase du calage en les appliquant à d'autres événements de référence.

La Fig. 13 présente la méthodologie mise en place pour caler/valider notre modèle.

Les événements de 2008 et 2010 sont choisis initialement pour ajuster les paramètres de calage. La bathymétrie dont nous disposons est proche de ces deux dates. De plus ce sont des phénomènes maritimes pour lesquels le niveau d'eau est surtout influencé par la marée à l'aval de l'estuaire. Or, les niveaux d'eau à l'aval de l'estuaire sont calés en priorité avant de remonter petit à petit jusqu'à l'amont de l'estuaire.

Une fois le jeu de paramètres établi pour ces deux événements, les crues de 1995 et 2001 sont, à leurs tours, simulées afin de valider la cohérence des paramètres de calage en particulier à l'amont de l'estuaire. Cette étape nous a conduits à modifier les coefficients de frottement à l'amont de l'estuaire et à introduire l'événement de 2013 dans nos simulations, les résultats de la crue de 1995 n'étant pas assez satisfaisants. Les paramètres ayant été modifiés, les événements de 2008 et 2010 sont à nouveau simulés pour vérifier que les modifications des coefficients de frottement à l'amont ne dégradent pas ces résultats.

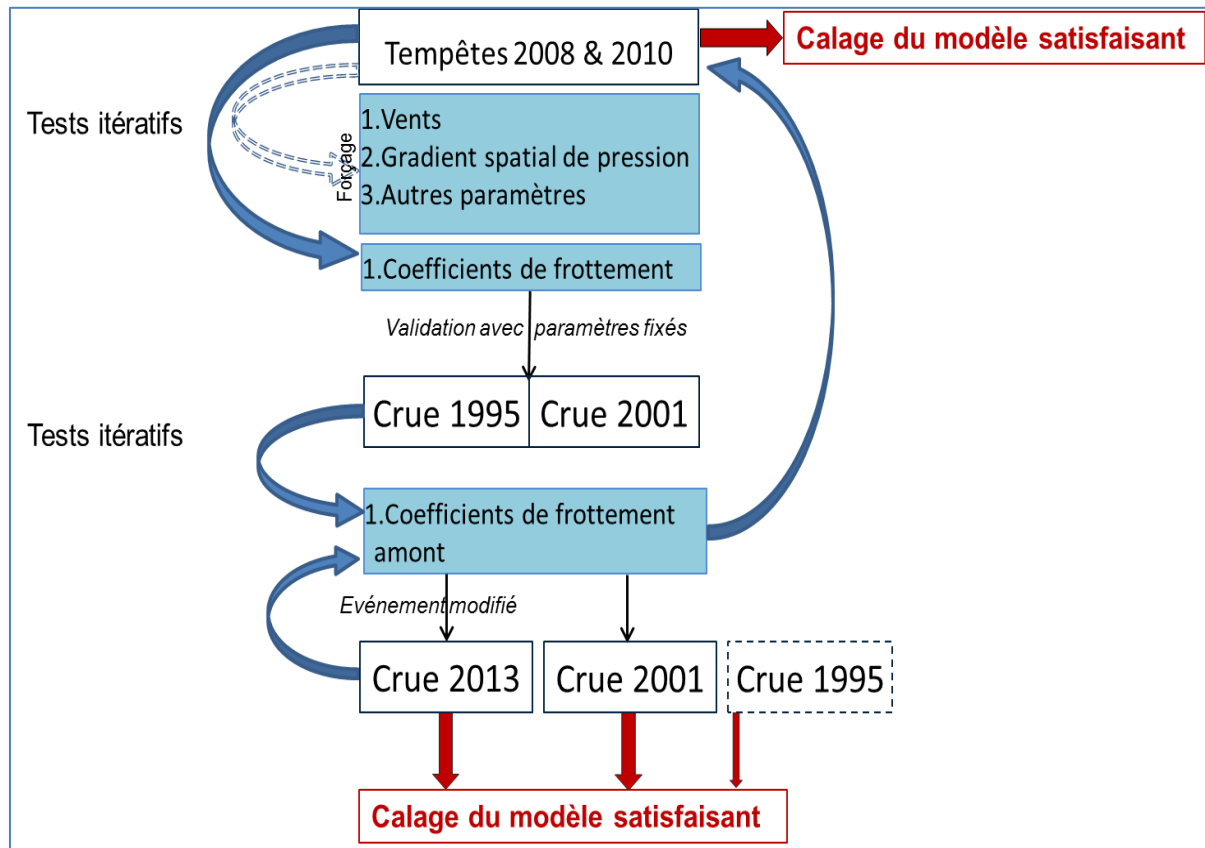


Fig. 13. Méthodologie de calage

6.4. PARAMETRES DU MODELE

6.4.1. Forçages du modèle

Sur l'ensemble du modèle, plusieurs forçages sont appliqués :

- Le vent est appliqué sur l'ensemble du modèle. Les données temporelles de vent (ramenées à 10m) de la station du Cap de la Hève sont propagées de façon décroissante (équation de décroissance obtenue sur la base d'analyses statistiques sur la mesure) vers l'amont de l'estuaire ;
- La prise en compte de la pression atmosphérique est effective sous Telemac-2D seulement s'il existe un gradient de pression spatial. Une interpolation linéaire de la pression atmosphérique est effectuée entre les deux stations de mesures dont les données sont disponibles, soit Le Havre et Rouen et cela uniquement pour les événements de 2008 et 2010, les données n'étant pas disponibles pour les événements de 1995 et 2001.

6.4.2. Conditions aux limites

Des conditions limites sont imposées à la frontière amont et à la frontière maritime du modèle.

A l'amont du modèle, les chroniques de débits journaliers de la Seine et de l'Eure constituent les apports hydrologiques.

A l'aval du modèle, la marée et les niveaux moyens sont imposés :

- En chaque nœud de la frontière maritime, les niveaux d'eau engendrés par la marée sont extraits des résultats du modèle de la Manche sous forme de séries temporelles. Le modèle de la Manche est un modèle de marée de grande emprise développée par ARTELIA (Fig. 14). Il est calé et validé par comparaison avec des marégraphes et fournit des conditions aux limites en hauteur d'eau et vitesses à des modèles plus côtiers. Les caractéristiques de ce modèle sont présentées succinctement en Annexe B ;
- Le niveau moyen au marégraphe du Havre permet de prendre en compte les différents phénomènes météorologiques locaux (surcote dépressionnaire ou décote anticyclonique, etc.). Au début de cette phase, il est calculé en effectuant la moyenne glissante sur 12h de la moyenne glissante sur 24h des niveaux d'eau au Havre. Ces niveaux moyens sont ajoutés sous forme de série temporelle à l'ensemble des points frontières maritimes, s'ajoutant ainsi au niveau d'eau fourni par le modèle de la Manche. Au cours de l'étape de calage, la prise en compte de ce niveau moyen a été modifiée (voir chapitre 6.4.3).

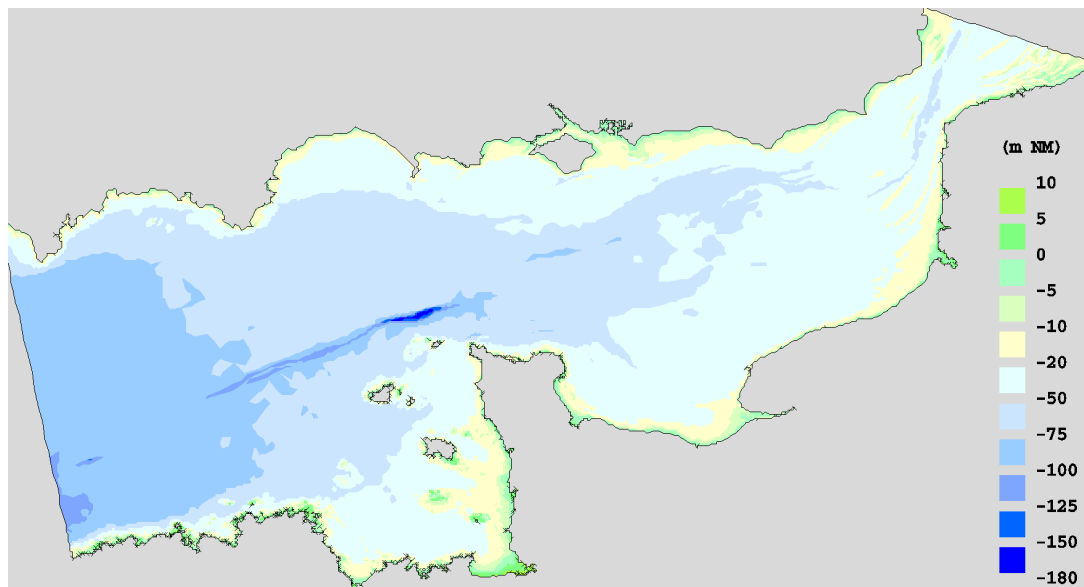


Fig. 14. Emprise du modèle de la Manche

6.4.3. Paramètres de calage

Le paramètre de calage le plus influent et qui a été fixé en premier lieu est le coefficient de frottement sur le fond qui traduit la rugosité du terrain. Dans notre cas, le linéaire de la Seine a été divisé en 30 zones pour lesquelles une valeur précise de coefficient de Strickler est appliquée. Ce paramètre nous permet de jouer sur la propagation de l'onde de marée et en particulier sur le phasage, le marnage et sur les niveaux de basse mer. Les coefficients de frottement imposés à l'aval du modèle ont un impact jusqu'à l'amont de l'estuaire. C'est pourquoi ce paramètre est d'abord ajusté à l'aval puis petit à petit jusqu'à l'extrémité amont de l'estuaire.

Comme le montre la Fig. 15, ajuster les coefficients de frottement ne nous permet pas d'obtenir des résultats cohérents avec les mesures pour les niveaux de pleine mer au moment des tempêtes. Ces niveaux sont davantage liés à des phénomènes météorologiques (vent, pression, surcote maritime).

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

Objectif C

RAPPORT FINAL V3

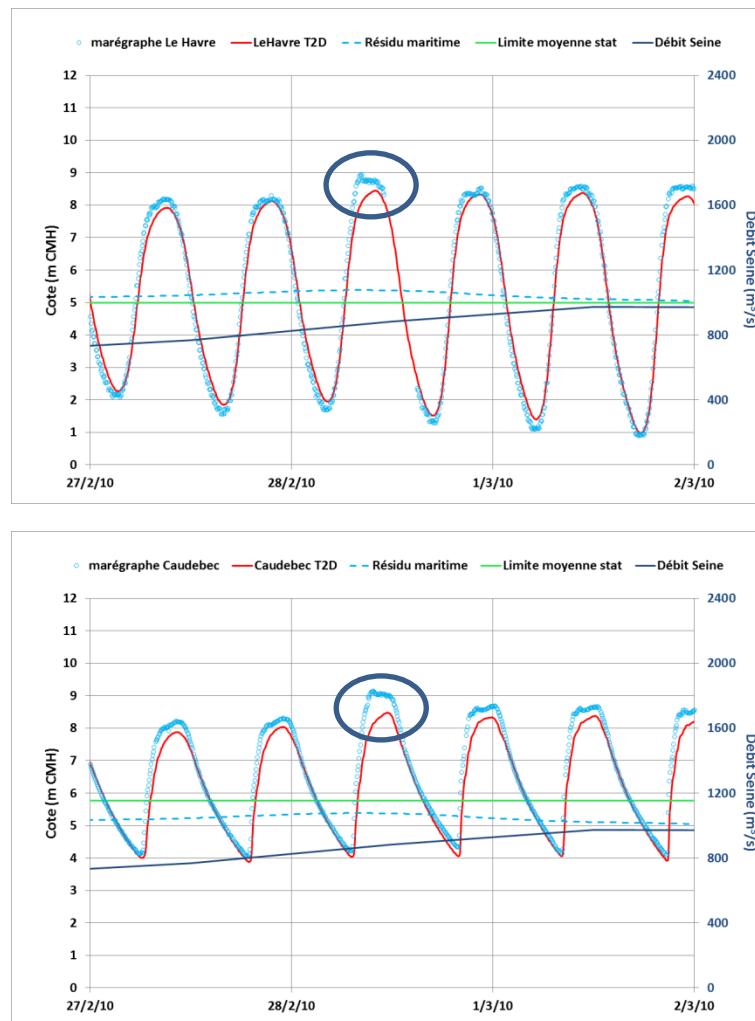


Fig. 15. Niveaux d'eau au Havre (en haut) et à Caudebec (en bas) pendant la tempête de 2010 – Résultats de calage provisoire

Ainsi, dans le but d'atteindre des niveaux de pleine mer corrects, la prise en compte des niveaux moyens à la frontière maritime a été modifiée.

La nouvelle méthode consiste à évaluer la différence entre le signal de marée obtenu au Havre dans le modèle ARTELIA de la Manche (servant également à forcer la frontière maritime), et le signal mesuré au marégraphe. Le signal obtenu que l'on nommera « résidu maritime » correspond donc à la partie du signal qui ne dépend pas de la marée mais des autres phénomènes maritimes. Une moyenne glissante sur 2h est appliquée à cette série temporelle afin d'en lisser les variations trop fortes. Ce nouveau signal est appliqué à la frontière maritime en lieu et place du niveau moyen décrit précédemment.

6.5. RESULTATS DU CALAGE

6.5.1. Préalable

Tous les résultats présentés ci-après pour les différentes périodes de calage sont issus des simulations finales utilisant le même jeu de paramètres. Seuls diffèrent les fichiers de forçage temporel, propres à chaque événement.

Le jeu de coefficient de frottement (de type Strickler) retenu pour le calage est défini sur la Fig. 16 ; dans le lit mineur, il évolue entre 25 et 85 selon les zones du modèle.

Un « résidu maritime » est rajouté au signal de niveau d'eau initial en chaque nœud de la frontière maritime.

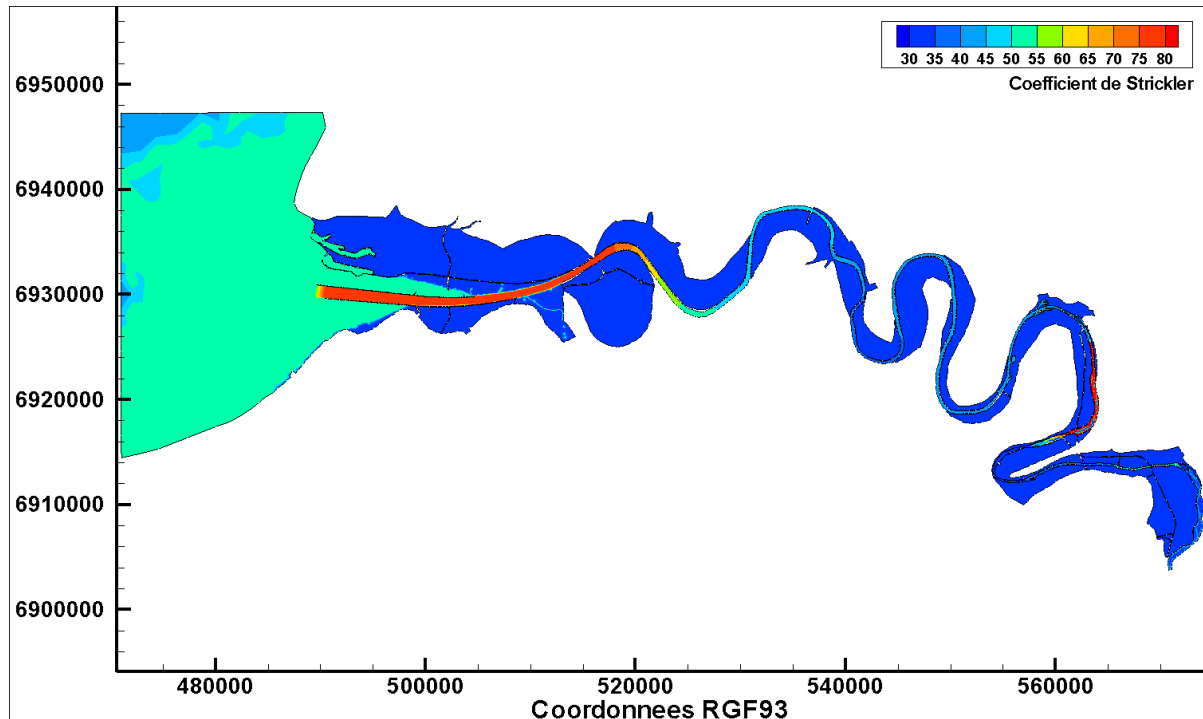


Fig. 16. Carte des coefficients de frottement retenus

6.5.2. Outils d'analyse du calage

Pour chacun des événements (1995, 2001, 2008 [1] et [2], 2010 et 2013) et pour chaque marégraphe disponible, les résultats sont présentés sous différentes formes :

- Des graphiques représentant l'évolution temporelle du niveau d'eau calculé par le modèle et observé au marégraphe ; le débit de la Seine est également présenté ;
- Un tableau permettant une analyse statistique du calage sur les niveaux d'eau supérieurs pour les 3 jours encadrant l'événement et pour la marée correspondant à l'événement;
- Une ligne d'eau présentant les niveaux d'eau maximaux sur la marée simulée.

Les 2 premiers indicateurs permettent de vérifier que le modèle propage correctement la marée le long de l'estuaire et que les écoulements modélisés ont la bonne dynamique (phasage des pleines mers, tenue de plein qui peut influencer la durée de submersion en cas de débordement par exemple). Le dernier indicateur permet de vérifier la cohérence du modèle en termes de niveau d'eau extrême.

Description de l'analyse quantitative du calage :

Le calage hydrodynamique est quantifié par des méthodes statistiques d'erreur absolue moyenne (MAE : Mean Absolute Error), d'écart type et de pourcentage de temps pendant lequel l'écart entre le modèle et la mesure respecte un critère X donné (CF(X), POF(X), NOF(X), où X correspond à une erreur acceptable définie par l'utilisateur).

L'erreur absolue moyenne et l'écart type sont des variables statistiques classiques qui permettent de caractériser la précision. Le NOS (National Ocean Service) américain a introduit les variables CF, POF, NOF qui apportent quant à elles une nouvelle vision pour quantifier un calage.

CF(X) indique le pourcentage de temps pendant lequel l'erreur est comprise dans des limites acceptables. POF(X) et NOF(X) représentent le pourcentage de temps pendant lequel l'erreur est respectivement supérieure et inférieure à X. POF(2X) et NOF(2X) représentent quant à eux le pourcentage de temps pendant lequel l'erreur est respectivement supérieure et inférieure à 2X, c'est-à-dire considérée comme assez importante.

Un rapide récapitulatif de ces différents indicateurs est disponible en annexe D – Figure 5.

La valeur choisie pour X est 0,10 mètres et la tolérance sur le déphasage en temps entre modèle et mesure est de plus ou moins 10 minutes.

6.5.3. Événement 10 mars 2008

(cf. Annexe D – Figure 6 et Figures 14 à 33)

Le signal de marée est correctement représenté par le modèle. Le phasage entre les instants de pleine mer et de basse mer modélisés et mesurés est bon. Lorsque que l'on remonte vers l'amont de l'estuaire, la déformation du signal de marée est bien cohérente entre mesure et modèle ; la pente de la courbe au moment des phases de montée et de descente de la marée est respectée par le modèle (Caudebec, Heurteauville, Mesnil Sous Jumièges, ...).

Les niveaux de pleine mer induits par la tempête sont globalement bien captés par le modèle en tout point. La tenue de plein plus longue à l'aval qu'à l'amont est respecté (du Havre à Aizier, où plus de 88% des résultats de la modélisation sont dans l'enveloppe délimitée à plus ou moins 0,1m par rapport à la mesure et où la MAE (erreur moyenne absolue) est inférieure à 6cm). De Duclair à Oissel, les niveaux d'eau sont bien représentés (plus de 79% des résultats sont situés dans l'enveloppe délimitée à plus ou moins 0,1m par rapport à la valeur de la mesure).

La station de Honfleur présente le meilleur taux de répartition des données simulées autour de la mesure, avec 96.8% situées dans l'enveloppe et inversement Elbeuf présente la plus mauvaise répartition avec 62.6%. Même si les niveaux de pleine mer sont cohérents entre modèle et mesure, la phase de reflux est trop rapide à ce marégraphe. Il convient de rappeler que l'événement de 2008 est de type maritime, utilisé pour calibrer plus précisément le modèle à l'aval de l'estuaire. Nous verrons, par la suite, que les résultats à Elbeuf sont meilleurs pour les autres événements en particulier la crue de 2013.

Les niveaux de basse mer paraissent très légèrement surestimés par le modèle au niveau de Mesnil-sous-Jumièges, Duclair, et Val-des-Leux mais ce ne sont pas les niveaux qui seront étudiés en phase d'exploitation de l'étude.

La ligne d'eau représentant les niveaux maximaux en fonction du PK (Point Kilométrique) confirme bien la qualité du modèle par comparaison avec les mesures (Figure 33).

6.5.4. Événement 21 mars 2008

(cf. Annexe D – Figure 7 et Figures 35 à 54)

Le signal de marée simulé par le modèle est en phase avec celui décrit par les mesures. La forme et les tenues de pleins sont cohérentes. La MAE (erreur moyenne absolue) sur l'ensemble des marégraphe est inférieure à 10cm, hormis à Heurteauville (11cm) et à Oissel (13cm).

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

Objectif C

RAPPORT FINAL V3

La station de la Balise A présente le meilleur taux de répartition des données simulées autour de la mesure avec 91% alors qu'à l'amont de l'estuaire, Oissel présente le taux de répartition le moins bon (53%).

Les niveaux hauts sont légèrement surestimés au Havre ainsi qu'à Oissel. Les résultats statistiques à l'amont d'Aizier peuvent paraître faibles par rapport aux autres événements (taux de répartition autour de la mesure entre 60 et 70%) sur les 3 jours autour de l'événement. Ceci est dû à un léger gonflement de la seconde marée du 20 mars qui cause une légère dégradation de ces résultats. A l'échelle de l'événement (première marée du 21 mars au Havre), les résultats sont tout à fait satisfaisants (au-delà de 75% à l'exception de Mesnil sous Jumièges et Heurteville).

La ligne d'eau (Figure 54) confirme la cohérence des plus hauts niveaux d'eau entre le modèle et les mesures marégraphiques.

6.5.5. Événement 2010

(cf. Annexe D – Figure 8 et Figures 56 à 75)

Le signal de marée est bien représenté par le modèle. Le modèle et la mesure sont en phase pour tous les marégraphes. La forme du signal est aussi cohérente entre le modèle et la mesure tout le long de l'estuaire y compris à Elbeuf et Pont de l'Arche (resp. 60% et 78% environ de données simulées à plus ou moins 0,1m de la mesure).

Les niveaux de pleine mer induits par la tempête Xynthia sont globalement bien captés par le modèle en tout point ainsi que la tenue de plein

La station d'Oissel présente à nouveau le meilleur taux de répartition des données simulées autour de la mesure, avec 98% situées dans l'enveloppe et inversement Caudebec présente la plus mauvaise répartition avec 71% et une MAE de 8cm. Le phasage et la tenue de plein sont bien représentées, mais les niveaux de plein sont légèrement trop faibles.

Les résultats à Fatouville et à Saint Leonard sont à prendre avec précaution car le signal du marégraphe semble saturer à l'approche de la pleine mer. La tendance globale du signal modélisée est malgré tout relativement bonne en dehors de cette période.

La figure 53, qui représente la ligne d'eau le long de l'estuaire, met en avant un manque au niveau du modèle. En effet, la ligne d'eau modélisée est globalement sous-estimée entre Honfleur et Caudebec et en particulier à Tancarville où le niveau extrême est sous-estimé par le modèle d'environ 50cm. Le modèle n'arrive pas à représenter correctement le gonflement du au vent compte tenu des données de forçage du vent qui n'excèdent pas les 50km/h au moment du passage de la tempête (cf. Tabl. 1 -). Des tests de sensibilité sur le vent ont été effectués et sont présentés ultérieurement.

6.5.6. Événement 2001

(cf. Annexe D – Figure 9 et Figures 77 à 96)

Les niveaux d'eau pour cet événement de type fluvial sont surtout liés au débit de la Seine. Le signal de marée est parfaitement représenté par le modèle. Le modèle et la mesure sont en phase pour tous les marégraphes. La forme du signal est aussi globalement cohérente entre le modèle et la mesure tout le long de l'estuaire jusqu'à Oissel. Les niveaux de pleine mer sont légèrement surestimés entre Vatteville et Duclair. Une incohérence entre la bathymétrie représentée par le modèle (datant d'après 2010) et la bathymétrie réelle en 2001 à l'intérieur de l'estuaire pourrait expliquer ce léger décalage.

Les stations du Havre, de Balise A et Honfleur présentent le meilleur taux de répartition des données simulées autour de la mesure, avec plus de 93% environ, situées dans l'enveloppe ; la plupart des

marégraphes présente des taux au-delà de 70%. Dans la majorité des cas, l'erreur est une surestimation de la pleine mer comprise en +10cm et +20cm (POF(X) élevé et POF(2X) faible). La MAE est inférieure à 8cm. La plus mauvaise répartition apparaît à La Bouille avec 66,4%, imputable à un léger décalage temporel entre la marée simulée et la mesure. Cependant, la forme de la marée et son niveau maximal sont correctement représentés.

Les niveaux de basse mer modélisés sont légèrement moins cohérents avec la mesure en certains marégraphes ; ils sont très légèrement surestimés par le modèle (Honfleur, Duclair) ou très légèrement sous-estimés (Tancarville, Saint Léonard) mais là encore, il est important de souligner que ce ne sont pas les niveaux qui seront étudiés en phase d'exploitation de l'étude.

La ligne d'eau des niveaux maximaux modélisée est cohérente avec celle mesurée (Figure 96).

6.5.7. Événement 1995

(cf. Annexe D – Figure 10 et Figures 98 à 117)

Le modèle est cohérent avec la mesure entre Le Havre et La Bouille où le taux de répartition des données simulées est supérieur à 75% excepté à La Risle (63,7% ; 9cm de MAE) où les niveaux hauts sont légèrement sous-estimés par le modèle.

Par contre, à l'amont de Rouen, le signal modélisé a tendance à se dégrader avec une MAE de 15cm à Elbeuf et 27cm à Oissel. Tout comme pour l'événement de 2001 se pose la question de la cohérence entre la bathymétrie en 1995 à l'intérieur de l'estuaire et celle du modèle.

La ligne d'eau, présentée sur la figure 117, confirme bien cette tendance à Elbeuf et Oissel.

6.5.8. Événement 2013

(cf. Annexe D – Figure 11 et Figures 119 à 140)

Les résultats pour l'événement 2013 sont cohérents avec les mesures aux marégraphes. Les taux de répartition des données simulées sont supérieurs à 79%, avec une MAE inférieure à 6cm, à l'exception de Fatouville (64% environ et une MAE de 10cm).

Par contre, à l'amont de La Bouille, les résultats sont nettement améliorés avec un taux de répartition supérieur à 89% (MAE inférieure à 6cm). Le phasage entre modèle et mesure est bon ainsi que la représentation des niveaux de pleine mer.

A noter que les niveaux d'eau à l'amont et à l'aval de l'écluse sont également bien modélisés. (Figures 138 et 139).

La ligne d'eau modélisée est cohérente avec la mesure sur tout le linéaire de l'estuaire (Figure 140).

6.5.9. Événement de 2010 – Vent renforcé

La modélisation de l'événement de 2010 « Xynthia » ne donne pas pleine satisfaction entre Honfleur et Caudebec et surtout à Tancarville où la différence entre mesure et modèle atteint les 50cm. Cette incohérence nous a poussés à reconsidérer nos données de forçage et en particulier les données de vent compte tenu du caractère maritime de l'événement.

Les données horaires montrent que l'épisode de tempête est relativement court ; les vents ne sont pas établis et fluctuent aussi en bien en termes de directions (entre 140°N et 300°N) que d'intensités. Le maximum d'intensité au cours de l'événement est de 14,1 m/s au Cap de la Hève à 100m d'altitude (soit environ 50km/h) ce qui correspond à une intensité ramenée à 10m d'altitude d'environ 9,75m/s (coefficient d'abattement de 1.445 entre le vent à 100m et le vent à 10m).

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

Objectif C

RAPPORT FINAL V3

L'autre donnée de vent disponible au cours de l'événement est la mesure à Lillebonne. Cette dernière montre des directions cohérentes avec celles du Cap de la Hève mais des intensités supérieures qui évoluent au-delà de 11m/s pendant 4h (avec un maximum de 14m/s, à comparer avec 9,75m/s, valeurs corrigées à 10m, au Cap de la Hève).

Au cours de l'objectif A, l'analyse du vent à partir de la mesure et du modèle a montré qu'un vent de 27,7m/s (230°N) au Cap de la Hève induisait une surcote liée au vent d'environ 40cm à Tancarville (cf. Tabl. 2 - Tabl. 3 -).

Tabl. 2 - Surcotes (cm), liées aux vents, et calculées par la modélisation

Tancarville (PK 340)		Amplitude Vent				
SURCOTE (cm)		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	

En ce qui concerne la tempête de 2008, les vents au Cap de la Hève dépassent les 20m/s pendant plusieurs heures (soit 14m/s à 10m). Les intensités à Lillebonne sont inférieures aux intensités ramenées à 10m au Cap de la Hève (entre 1,1 et 2,6 fois plus faibles). Quant aux directions, elles varient ponctuellement de 20/30° par rapport à celles relevées au Cap de la Hève.

Différents tests de sensibilité ont donc été réalisés sur l'intensité et la direction du vent.

La Figure 12 et les Figures 142 à 161 montrent les résultats obtenus en augmentant le vent en entrée du modèle (reconstitution d'un signal de vent à partir de la mesure à Lillebonne). Ces résultats sont comparés avec ceux de la simulation de l'événement de 2010 présentés au chapitre 6.5.5 (courbe rouge : vent Météo France au Cap de la Hève ; courbe noire : vent reconstitué à partir du signal à Lillebonne).

La ligne d'eau des niveaux maximaux est améliorée en particulier à l'aval de Caudebec (Figure 161). La tendance globale de la ligne d'eau et son gonflement sont cohérents avec les mesures et les niveaux maximaux sont récupérés à Caudebec, Vatteville, Honfleur et Balise A. A Tancarville, le modèle sous-estime encore légèrement le niveau maximal (MAE égale à 0,07m).

Le signal de marée est toujours bien représenté par le modèle en termes de phasage et de tenue de plein (taux de répartition au-delà des 75% pour la plupart des marégraphes et MAE inférieure à 7cm). En dehors de l'instant de pleine mer, les résultats sont peu voir pas modifiés par rapport à la simulation initiale.

Tabl. 3 - Comparaison des surcotes liées au vent évaluées par l'analyse des mesures et par modélisation

	TANCARVILLE	
Vent au Cap de la Hève (m/s)	Surcote liée au vent obtenue par analyse des mesures (cm)	Surcote liée au vent obtenue par modèle (cm)
13	13	10
17	19	17
20.7	25	24
27.7	38	40

6.6. LIMITATIONS DU MODELE

Conditions de forçage

Le modèle a été construit et optimisé afin de représenter au mieux la ligne d'eau maximale dans le lit mineur lors d'événements extrêmes (crues, tempêtes...), en prenant en compte les échanges entre le lit mineur et le lit majeur. Le modèle n'a pas été développé pour étudier les écoulements dans le lit majeur. Par conséquent, au vu de la discrétisation large dans le lit majeur, le modèle, dans son état actuel, ne peut pas être employé à des fins de cartographie des zones inondables du lit majeur.

De même, le calage hors crue a été effectué pour des débits relativement importants (débit minimal lors de l'événement du 10 mars 2008, $579\text{m}^3/\text{s}$) ; le modèle n'est donc pas adapté à l'étude des lignes d'eau en étiage dans l'état actuel.

Cependant, le modèle pourra être adapté pour répondre à de nouveaux besoins dans le futur.

Enfin, la méthode d'imposition du vent est telle que, lors d'épisodes de vent d'ouest importants couplés à une forte surcote maritime, les niveaux d'eau en amont peuvent être légèrement surestimés.

Modèle à fond fixe

Dans la réalité, les courants, mêmes modérés, occasionnent sur les fonds un transport de matériaux. Les modifications morphologiques qui en résultent sont plus ou moins rapides, et résultent de l'adaptation mutuelle, au cours du temps, de l'écoulement et de la topographie des fonds : érosion des sédiments depuis le fond, charriage par les courants et dépôt lorsque la force tractrice de l'écoulement devient trop faible.

Dans le cas présent, le type de modélisation mis en œuvre suppose intrinsèquement que le fond du lit est fixe, c'est-à-dire qu'il ne peut pas évoluer sous l'action de l'écoulement. Cette hypothèse devra donc être gardée à l'esprit pour l'évaluation des résultats issus du modèle.

Écoulement à surface libre

Le logiciel TELEMAC-2D mis en œuvre dans la présente étude résout les équations bidimensionnelles régissant la dynamique des écoulements à surface libre.

Si, dans la réalité, les écoulements peuvent passer en charge au droit d'un ouvrage particulier, soit parce que la voûte de l'ouvrage est basse, soit du fait de la formation d'un embâcle de bois ou de glace, ce phénomène ne pourra pas être pris en compte directement par la simulation. Il serait cependant possible d'ajouter dans le modèle une perte de charge locale au droit de l'ouvrage afin de reproduire ce phénomène.

7. SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

Afin de répondre aux objectifs de la présente phase de l'étude, un modèle hydraulique bidimensionnel de la Seine a été développé. Il s'étend de Saint Pierre du Vauvray à l'amont jusqu'à l'embouchure de la Seine à l'aval (15 km au large du Havre environ). Il englobe une partie du lit majeur de la Seine c'est-à-dire la zone potentiellement inondable pour les événements extrêmes afin de bien représenter les volumes transitant entre le lit mineur et le lit majeur.

La méthode innovante « RIG » est développée sur la base du logiciel TELEMAC-2D. Cette méthode repose sur une externalisation du traitement des digues et des infrastructures en remblais : celles-ci sont considérées comme une singularité en dehors du modèle et répondent à des lois hydrauliques. Ainsi, il n'est plus utile de représenter les digues, routes, ouvrages de franchissement précisément dans le maillage ce qui induit une diminution du nombre de nœuds de calcul et donc un gain de temps pour les simulations.

Le modèle est construit sur la base de données de bathymétrie et de topographie très précises.

Le vent et un gradient de pression atmosphérique (calculé à l'aide des mesures au Havre et à Rouen) sont implémentés dans le modèle. Ce modèle s'appuie sur les résultats du modèle de la Manche, de plus grande emprise, qui lui fournit sur sa limite maritime les hauteurs d'eau correspondantes. A cela s'ajoute l'imposition d'un « résidu maritime » qui correspond à la partie du niveau d'eau influencée par les phénomènes météorologiques (vent, surcote, pression) et non par la marée et un jeu de coefficients de frottement qui varient spatialement le long de l'estuaire.

Le modèle est calé et validé sur 6 événements de calage : les tempêtes de 2008 et 2010 et les crues de 1995, 2001 et 2013.

Le signal de marée est correctement représenté par le modèle. Le phasage entre les instants de pleine mer et de basse mer modélisés et mesurés est bon pour chaque événement. Lorsque que l'on remonte vers l'amont de l'estuaire, la déformation du signal de marée est bien cohérente entre mesure et modèle ; la pente de la courbe au moment des phases de montée et de descente de la marée est respectée par le modèle en tout point.

La prise en compte du « résidu maritime », différence entre le niveau maximal donné par le modèle de la Manche et le niveau maximal relevé au marégraphe du Havre, à la frontière maritime permet de bien représenter les niveaux de pleine mer au moment des tempêtes de 2008 et 2010.

Pour l'événement 2008 [1], plus de 80% des résultats sont situés dans l'enveloppe délimitée à plus ou moins 10cm par rapport à la valeur de la mesure pour la plupart des marégraphes à l'exception d'Elbeuf qui présente la plus mauvaise répartition avec 62,6%.

Pour l'événement 2008 [2], les niveaux maximum simulés lors de la marée du 21 mars 2008 sont cohérents avec les niveaux maximum mesurés aux marégraphes.

Les résultats de l'événement de 2010 sont aussi cohérents avec les mesures tout le long de l'estuaire y compris à Oissel et Pont de l'Arche (resp. 98% et 78% environ de données simulées à plus ou moins 10cm de la mesure). Les niveaux de pleine mer induits par la tempête Xynthia sont globalement bien captés par le modèle en tout point ainsi que la tenue de plein. La station d'Oissel présente le meilleur taux de répartition des données simulées autour de la mesure, avec 98% situées dans l'enveloppe et inversement Caudebec présente la plus mauvaise répartition avec 71% et une MAE égale à 8cm. Cette erreur est constatée lors des pleines mers : la tenue de plein est satisfaisante mais le niveau insuffisant. Cependant, la représentation de la ligne d'eau le long de l'estuaire, montre que le modèle sous-estime les niveaux extrêmes entre Honfleur et Caudebec et surtout à Tancarville où le niveau extrême est sous-estimé par le modèle d'environ 50cm. Des tests de sensibilité ont été effectués sur la donnée d'entrée du vent qui semble à première vue un peu faible pour gonfler suffisamment la ligne d'eau à l'entrée de l'estuaire. En renforçant le vent à l'embouchure sur la base du vent mesuré à Lillebonne, les résultats sont concluants et la ligne d'eau modélisée est nettement améliorée à l'aval de Caudebec.

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

Objectif C

RAPPORT FINAL V3

Les niveaux d'eau pour l'événement de 2001, de type fluvial, sont surtout liés au débit de la Seine. La plupart des marégraphes présente des taux de répartition au-delà de 70% par rapport à la mesure et une MAE inférieure à 8cm. La plus mauvaise répartition apparaît à La Bouille avec 66,4%, imputable à un léger décalage temporel entre la marée simulée et la mesure. Cependant, la forme de la marée et son niveau maximal sont correctement représentés. Les niveaux de pleine mer sont légèrement surestimés entre Vatteville et Heurteauville. Une incohérence entre la bathymétrie représentée par le modèle (au-delà de 2010) et la bathymétrie réelle en 2001 à l'intérieur de l'estuaire pourrait expliquer ce léger décalage.

La simulation de l'événement de 1995 amène les conclusions suivantes : le modèle est cohérent avec la mesure entre Le Havre et La Bouille où le taux de répartition des données simulées est supérieur à 75% excepté à La Risle (64% ; 9cm de MAE) où les niveaux hauts sont légèrement sous-estimés par le modèle. A l'amont de Rouen, le signal modélisé a tendance à se dégrader avec une MAE de 15cm à Elbeuf et 27cm à Oissel. Tout comme pour l'événement de 2001 se pose la question de la cohérence entre la bathymétrie réelle en 1995 et celle du modèle.

L'événement de 2013 permet de valider les résultats en particulier à l'amont de La Bouille où les résultats sont nettement améliorés avec un taux de répartition supérieur à 89% par rapport à la mesure (MAE inférieur à 6cm). De plus, les niveaux d'eau issus du modèle restent cohérents avec les mesures entre l'embouchure et Petit Couronne avec des taux de répartition des données simulées supérieurs à 79% à l'exception de Fatouville (64% environ et une MAE de 10cm). Le phasage entre modèle et mesure est bon ainsi que la représentation des niveaux de pleine mer.

Le modèle construit dans le cadre de la présente étude est ainsi calé et validé sur l'ensemble de l'estuaire. La représentativité des écoulements est bonne pour des événements extrêmes (crues, tempêtes...) en prenant en compte les échanges entre le lit mineur et le lit majeur. Le modèle est apte à simuler différentes conditions d'exploitation.

ANNEXE A

Telemac2D

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

Objectif C

RAPPORT FINAL V3

Le système-logiciel utilisé pour mettre en œuvre la modélisation est TELEMAC ; il est développé par le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) de la R&D d'EDF. Le logiciel TELEMAC-2D résout, par une méthode aux éléments finis sur des maillages triangulaires, les équations de Barré Saint-Venant (1871) à deux dimensions d'espace horizontales obtenues par simplification des équations de Navier-Stokes. Les hypothèses de simplification utilisées dans le logiciel TELEMAC-2D sont : le fluide est de type newtonien et incompressible et la pression hydrostatique est moyennée sur la verticale, depuis le fond jusqu'à la surface, en deux dimensions. Ainsi, TELEMAC-2D résout simultanément les trois équations suivantes :

- l'équation de conservation de la masse du fluide définie par Navier-Stokes

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial HU}{\partial x} + \frac{\partial HV}{\partial y} = 0$$

avec U et V les vitesses horizontales moyennées sur la verticale, H la hauteur d'eau ;

- l'équation de conservation de la quantité de mouvement, principe fondamental de la dynamique (somme des forces = accélération), dans le cas d'un fluide incompressible et newtonien :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho H} + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} \left(H\nu \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} \left(H\nu \frac{\partial U}{\partial y} \right)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho H} + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x} \left(H\nu \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} \left(H\nu \frac{\partial V}{\partial y} \right)$$

avec ρ la masse volumique de l'eau, g l'accélération de la pesanteur, ν le coefficient de viscosité cinématique, τ_x et τ_y les composantes de la contrainte au fond.

Les termes de gauche correspondent à l'accélération du fluide intégrée sur la verticale et les termes de droite correspondent aux forces de pression et aux forces visqueuses.

Deux conditions aux limites au fond sont associées à ces équations : l'imperméabilité et la contrainte au fond par une loi de frottement. D'autre part, deux conditions aux limites à la surface libre sont aussi associées à ces équations : l'imperméabilité (ce qui permet de déduire la hauteur d'eau) et la contrainte à la surface qui est nulle sauf en présence de vent.

En chaque point du maillage, les principaux résultats en sortie du modèle sont la hauteur d'eau, et les vitesses horizontales moyennées sur la verticale.

ANNEXE B

Modèle de la Manche

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

Objectif C

RAPPORT FINAL V3

Le modèle de la Manche, dont la bathymétrie est issue des cartes SHOM, s'étend sur environ 900 km de côtes françaises et 650 km de côtes anglaises. Son emprise et son maillage sont présentés sur la Fig. 14 et la Fig. 17.

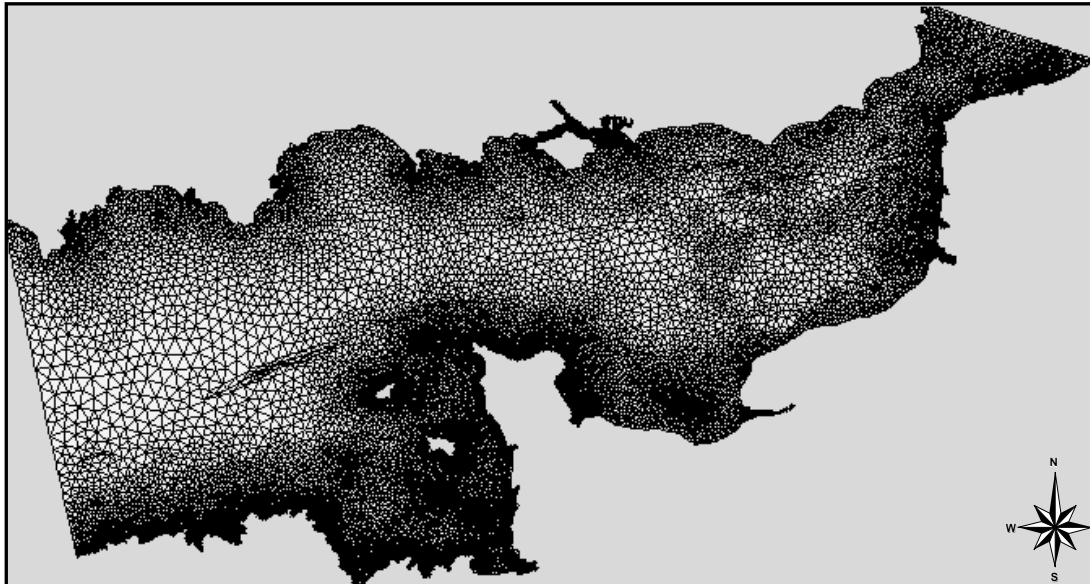


Fig. 17. Maillage du modèle de la Manche - ARTELIA.

La validité et la qualité des résultats obtenus avec ce modèle sont présentées par une analyse de la principale composante de l'onde de marée « M2 ». Les caractéristiques de cette onde de marée (amplitudes et phases) sont présentées sur la Fig. 18 et la Fig. 19.

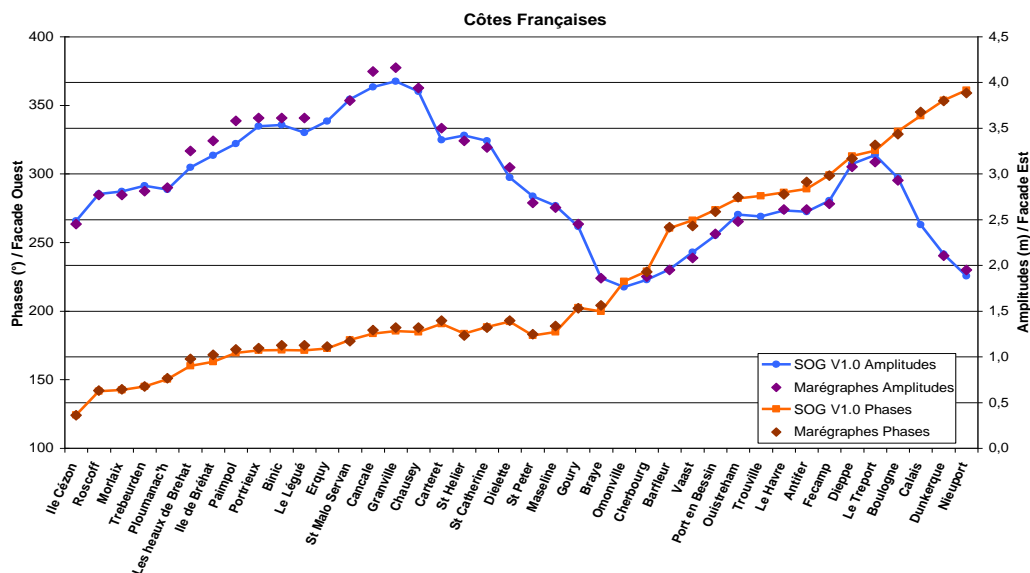


Fig. 18. Caractéristiques de l'onde M2 en amplitude et en phase

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

Objectif C

RAPPORT FINAL V3

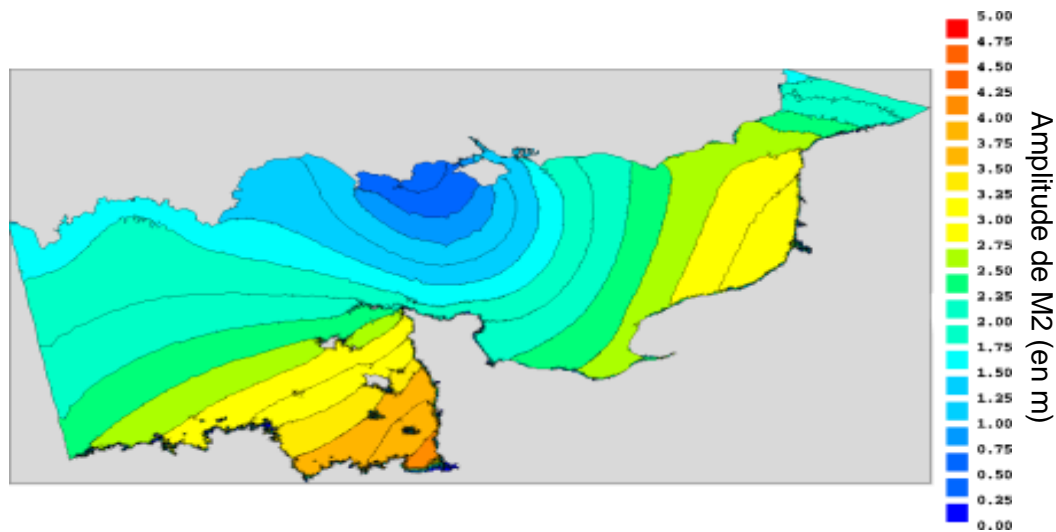


Fig. 19. Caractéristiques de l'onde M2 en amplitude

Onde M2 - Comparaison par tableau – Premier jeu de marégraphes utilisés par M. Forneirino

Dans un premier temps, les résultats obtenus sont comparés à d'autres modèles de la Manche par moyenne globale et écarts extrêmes. Nos résultats sont comparés avec ceux d'un modèle mathématique (modèle de Forneirino) et d'un modèle physique (modèle de Le Provost) dans le Tabl. 4 - .

Tabl. 4 - Comparaison des résultats du modèle de la Manche « SOG V1.0 » aux autres modèles physique (de Ch. Le Provost) et mathématique (de M. Forneirino)

		Côte Française		Côte Anglaise	
		Ecart Moyen	Ecart Maximum	Ecart Moyen	Ecart Maximum
Modèle Physique (Le Provost)	Amplitudes (cm)	5.25	9.0	7.56	22.0
	Phases (°)	2.25	6.0	8.75	25.0
Modèle Mathématique (Forneirino)	Amplitudes (cm)	6.6	11.0	9.9	29.0
	Phases (°)	4.23	6.6	10.38	43.0
Modèle SOGREA H V1.0	Amplitudes (cm)	2,17	3,45	3,9	13,2
	Phases (°)	1,16	1,92	2,8	9,7

La qualité de notre modèle est nettement supérieure à celle du modèle mathématique et du modèle physique. L'écart maximum sur la côte française est observé à Fécamp en amplitude et à Boulogne en phase. L'écart est plus significatif sur la côte anglaise. Il s'agit essentiellement des amplitudes des marégraphes de l'extrémité Ouest de la manche (Salcome, Teignmouth, Lyme Regis). Il est à noter

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

Objectif C

RAPPORT FINAL V3

que le calage du modèle a montré que l'influence du frottement est pratiquement nulle sur la qualité du modèle de ce secteur. Il apparaît donc clairement que le modèle est fortement influencé par des imprécisions sur les conditions aux limites de la frontière Ouest.

Analyse de l'onde M2 - Marégraphes de durée d'enregistrement supérieure à un an

La liste des marégraphes disponibles sur la Manche, dont la durée d'enregistrement est supérieure à un an, est la suivante :

Angleterre : Devonport, Portland, Portsmouth, Nab Tower, NewHaven, Dover, Ramsgate,

France : Dunkerque, Dieppe, Le Havre, Barfleur, Cherbourg, St-Héliier, St Malo-St Servan.

Le Tabl. 5 - présente les amplitudes et les phases des données et les écarts avec le modèle SOG V1.0 :

Tabl. 5 - Résultats du modèle de la Manche pour l'onde M2 sur l'ensemble des marégraphes en Manche de durée d'enregistrement supérieur à 1 an

Nom	M2			
	Amp (m)	Phi (°)	Ecart (cm)	Ecart (°)
Devonport	1,723	152,1	-3,2	2,3
Portland	0,653	188,8	-2,3	4,7
Portsmouth	1,454	325,7	-2,5	0,4
Nab Tower	1,444	320,6	-0,9	-3,3
NewHaven	2,267	322,0	-0,6	1,0
Dover	2,285	333,8	-0,5	-0,9
Ramsgate	1,877	339,9	-2,0	-1,1
Dunkerque	2,123	353,7	-1,8	-0,6
Dieppe	3,109	313,0	-3,0	-1,9
Le Havre	2,601	286,4	1,0	-1,4
Barfleur	1,955	260,4	-0,5	0,6
Cherbourg	1,843	229,1	3,4	-0,6
St Héliier	3,420	183,6	-6,0	-1,4
St Malo-St Servan	3,813	179,0	-1,3	-1,0
	Ecart moyen (valeurs absolues)		2,07	1,51

Les valeurs moyennes de 2,07 cm et 1,51° peuvent être considérées comme remarquables car elles cumulent à la fois le secteur Français et le secteur Anglais.

En ce qui concerne les phases, les écarts sont plus importants sur l'Angleterre, notamment autour du point amphidromique de Sandown (point à marnage nul). Sur la partie française, l'écart relatif n'est plus que de 1° en moyenne soit 2 minutes en temps.

Analyse de l'onde M2 - Développé le long des côtes

Sur les 92 marégraphes disponibles en Manche sur les côtes françaises et anglaises, la comparaison de l'amplitude et de la phase de cette onde de marée par rapport aux mesures permet de conclure en sa très bonne représentation par le modèle de la Manche. La côte normande est parfaitement représentée pour ce qui est de l'amplitude et de la phase de l'onde M2 de la marée (et notamment le secteur de la baie de Seine).

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

Objectif C

RAPPORT FINAL V3

Le modèle de grande emprise de la Manche représente parfaitement la propagation de l'onde marée et les courants généraux en Manche.

Le modèle hydrodynamique de l'estuaire de la Seine dédié à la présente étude s'appuie sur les résultats de ce dernier, qui lui fournit sur sa limite maritime les hauteurs d'eau et courants de marée correspondants.

Tabl. 6 - Ecart entre les résultats du modèle de la Manche et les mesures issues des 92 marégraphes disponibles en Manche pour l'onde de marée M2

		Côte Française		Côte Anglaise	
		Ecart Moyen	Ecart Maximum	Ecart Moyen	Ecart Maximum
<i>Modèle SOGREAH V1.0</i>	<i>Amplitudes (cm)</i>	<i>6,74</i>	<i>25,02</i>	<i>4,53</i>	<i>13,2</i>
	<i>Phases (°)</i>	<i>2,02</i>	<i>5,11</i>	<i>2,23</i>	<i>9,7</i>

ANNEXE C

Modèle Numérique de Terrain

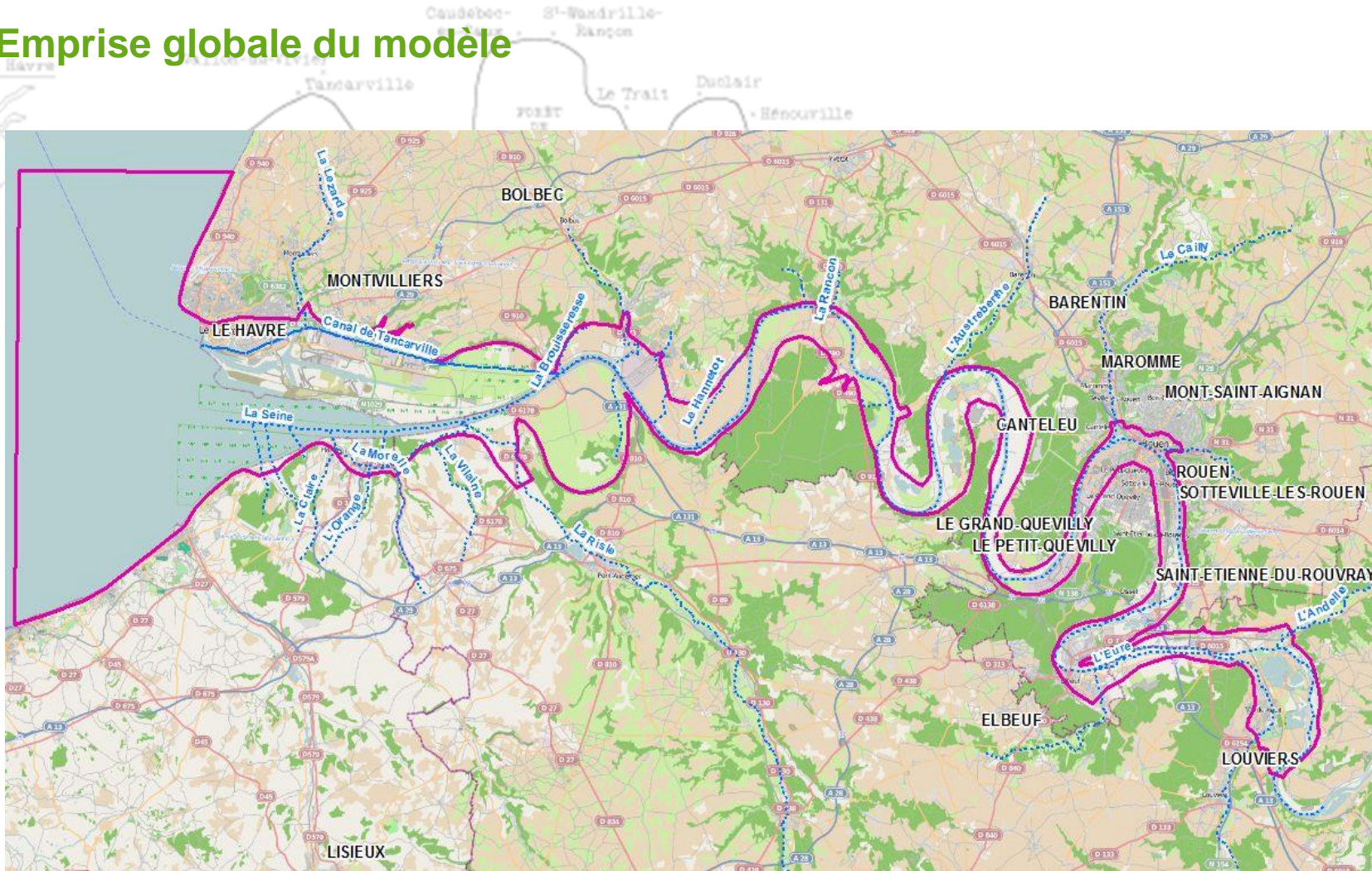


GROUPEMENT D'INTERET PUBLIC SEINE AVAL

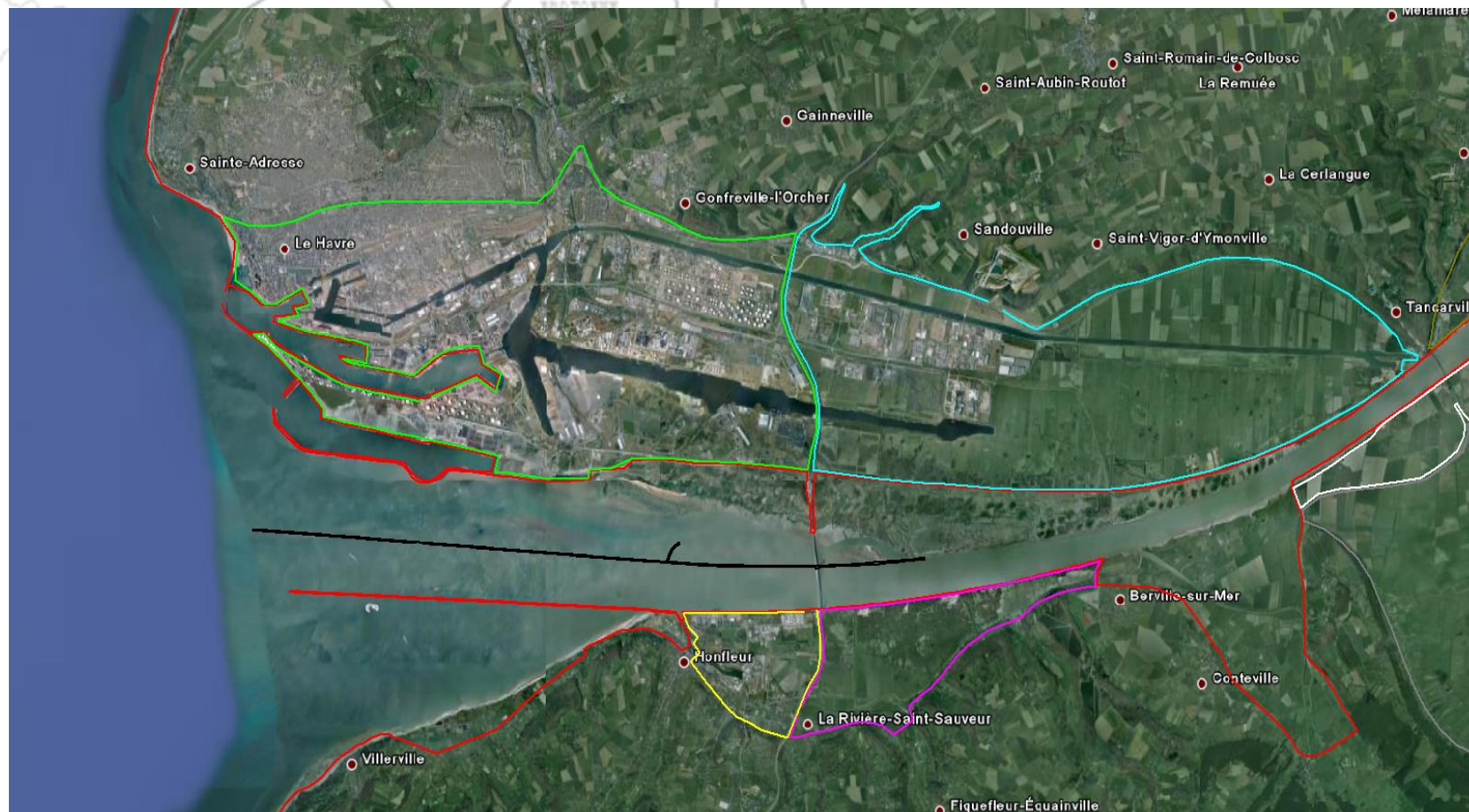
Modélisation de l'estuaire de la Seine

Modèle Numérique de Terrain

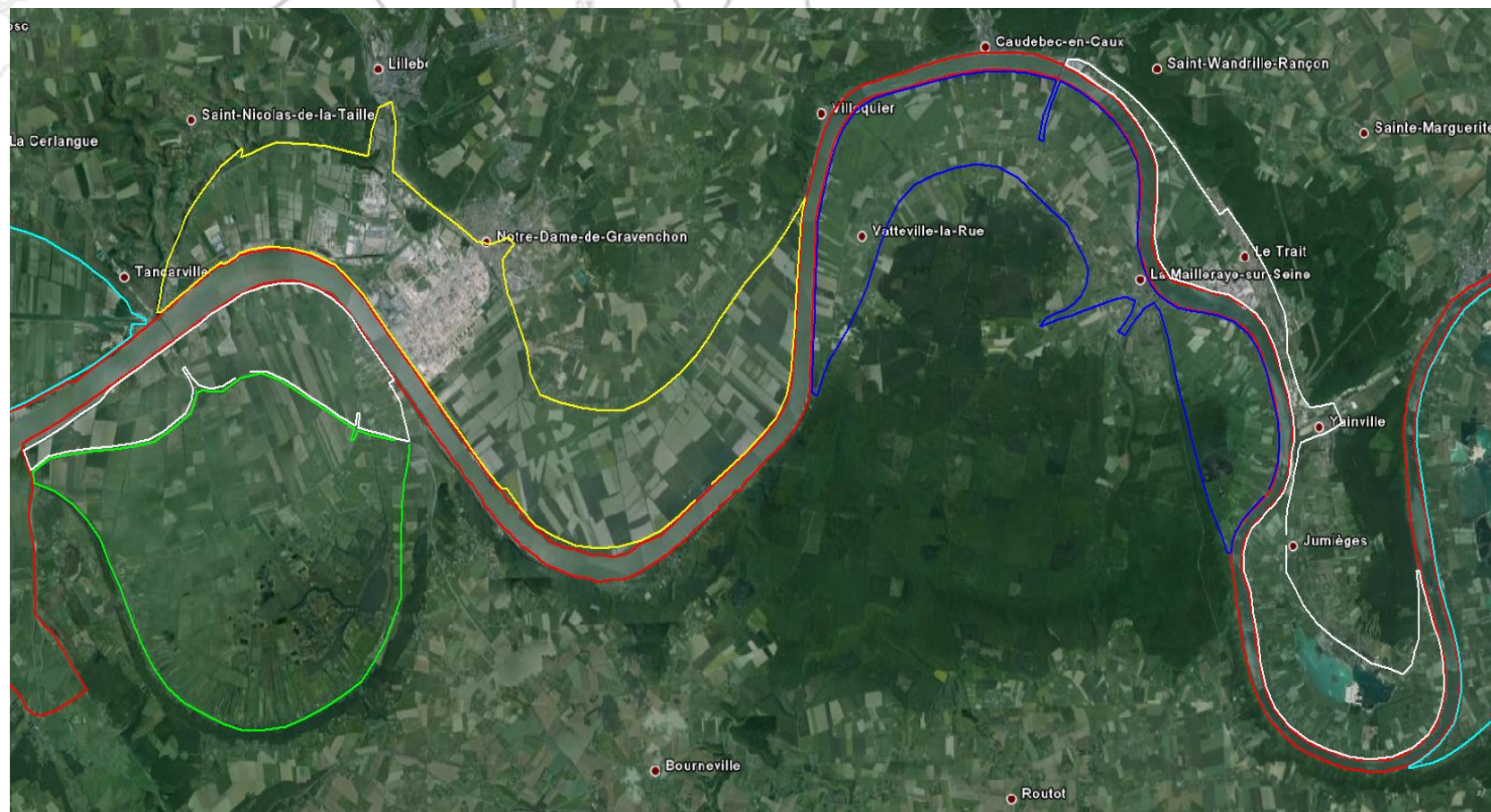
Emprise globale du modèle



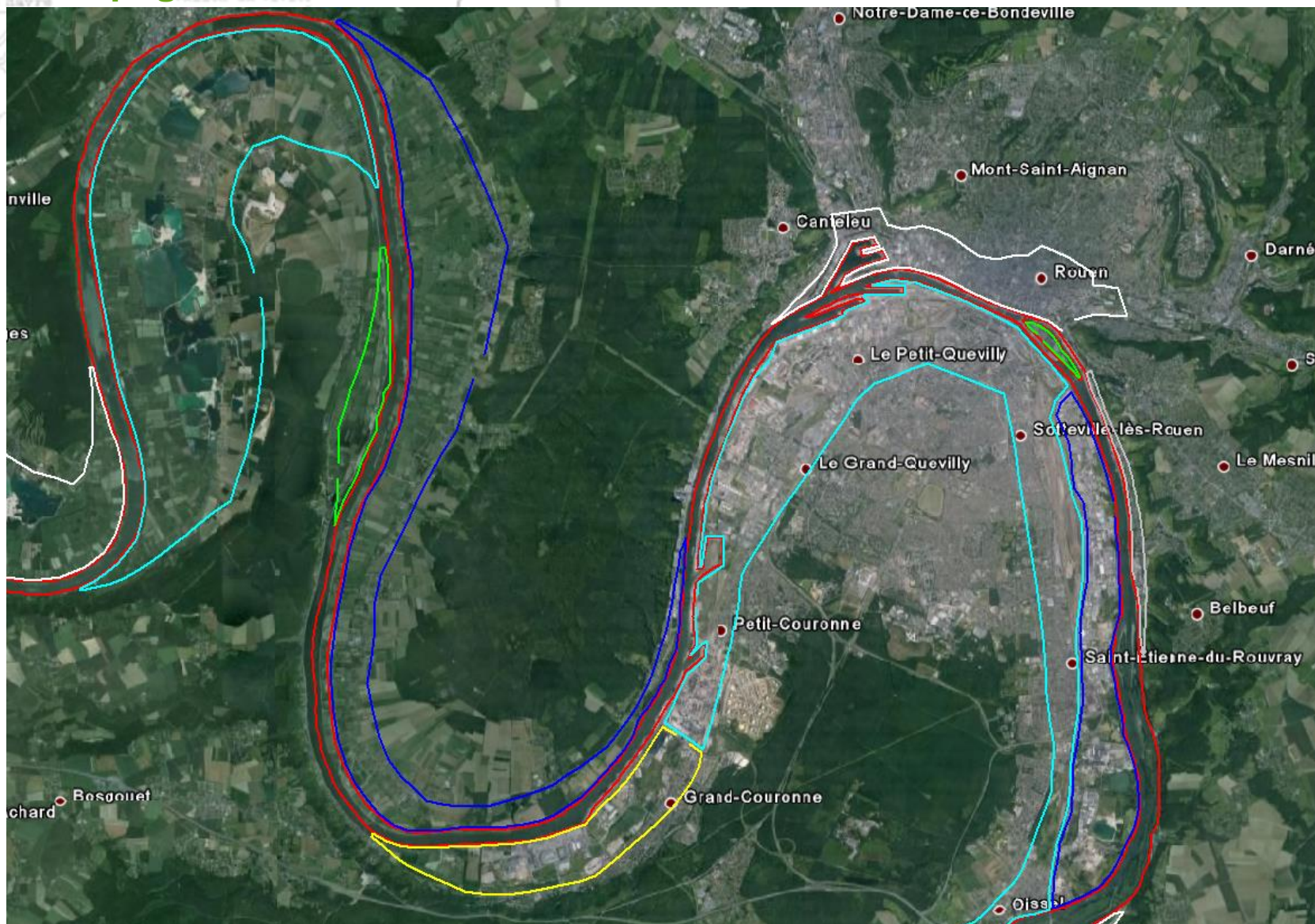
Découpage en sous-modèles – Embouchure



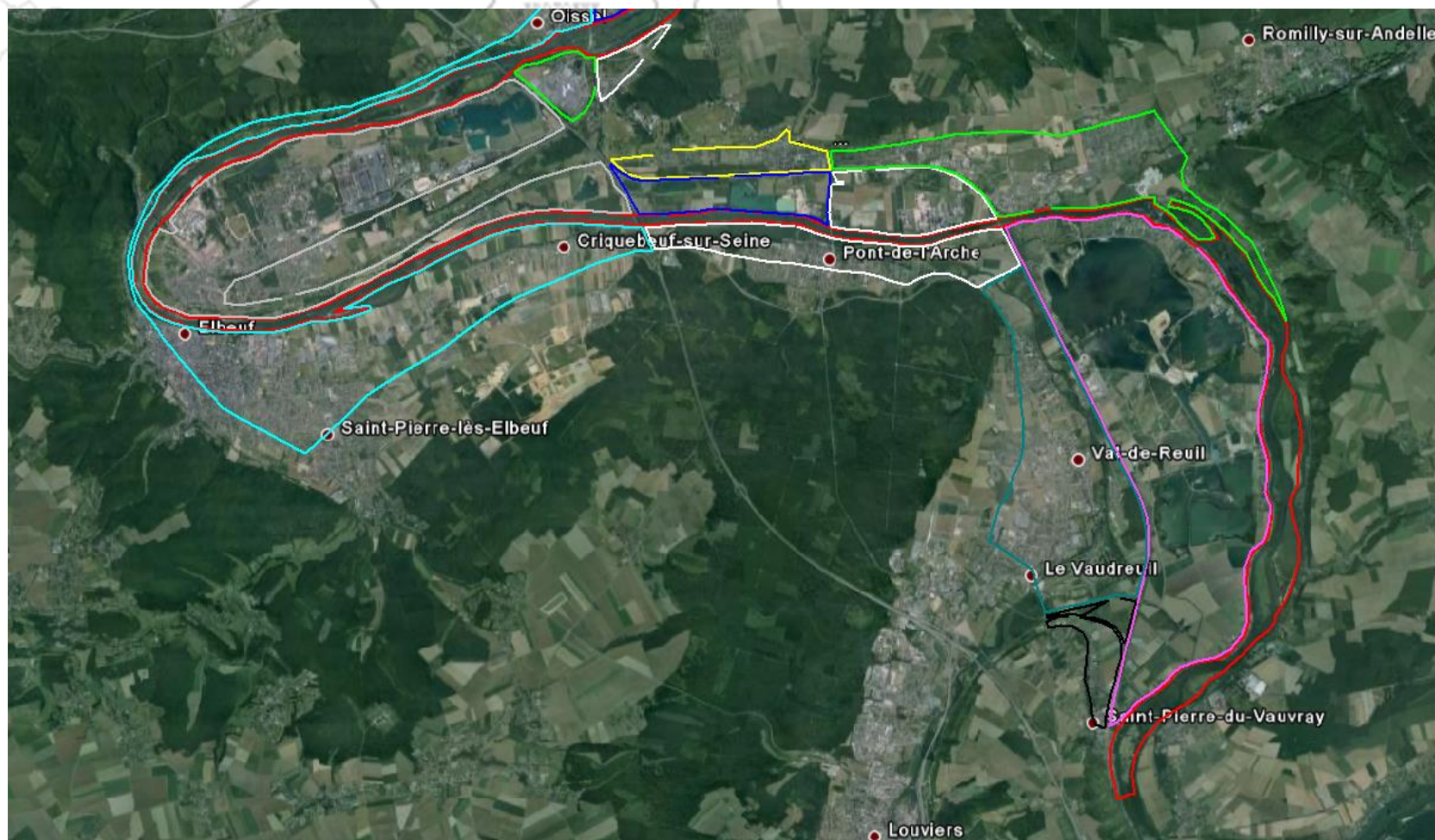
Découpage en sous-modèles – Amont de Tancarville



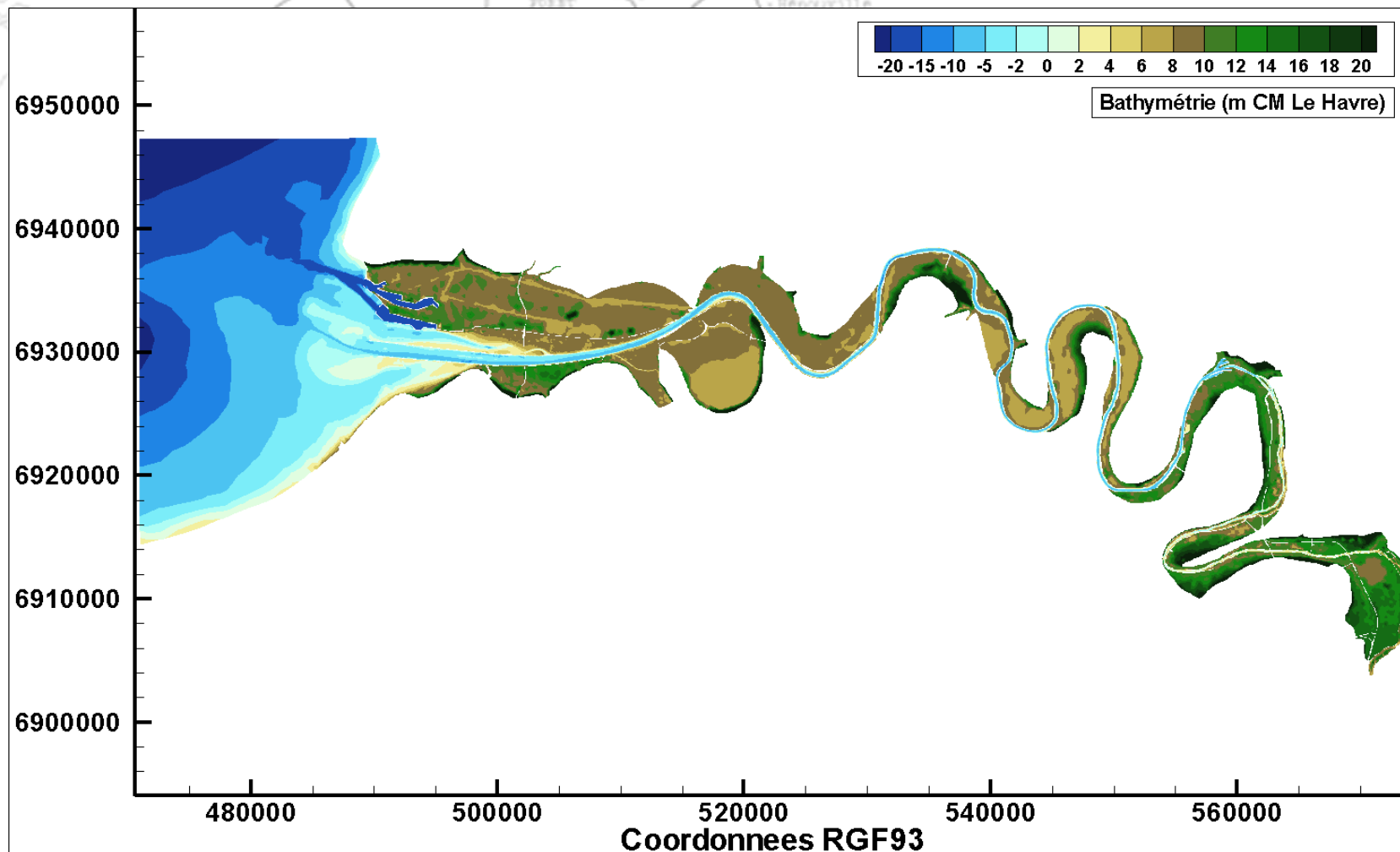
Découpage en sous-modèles – Rouen



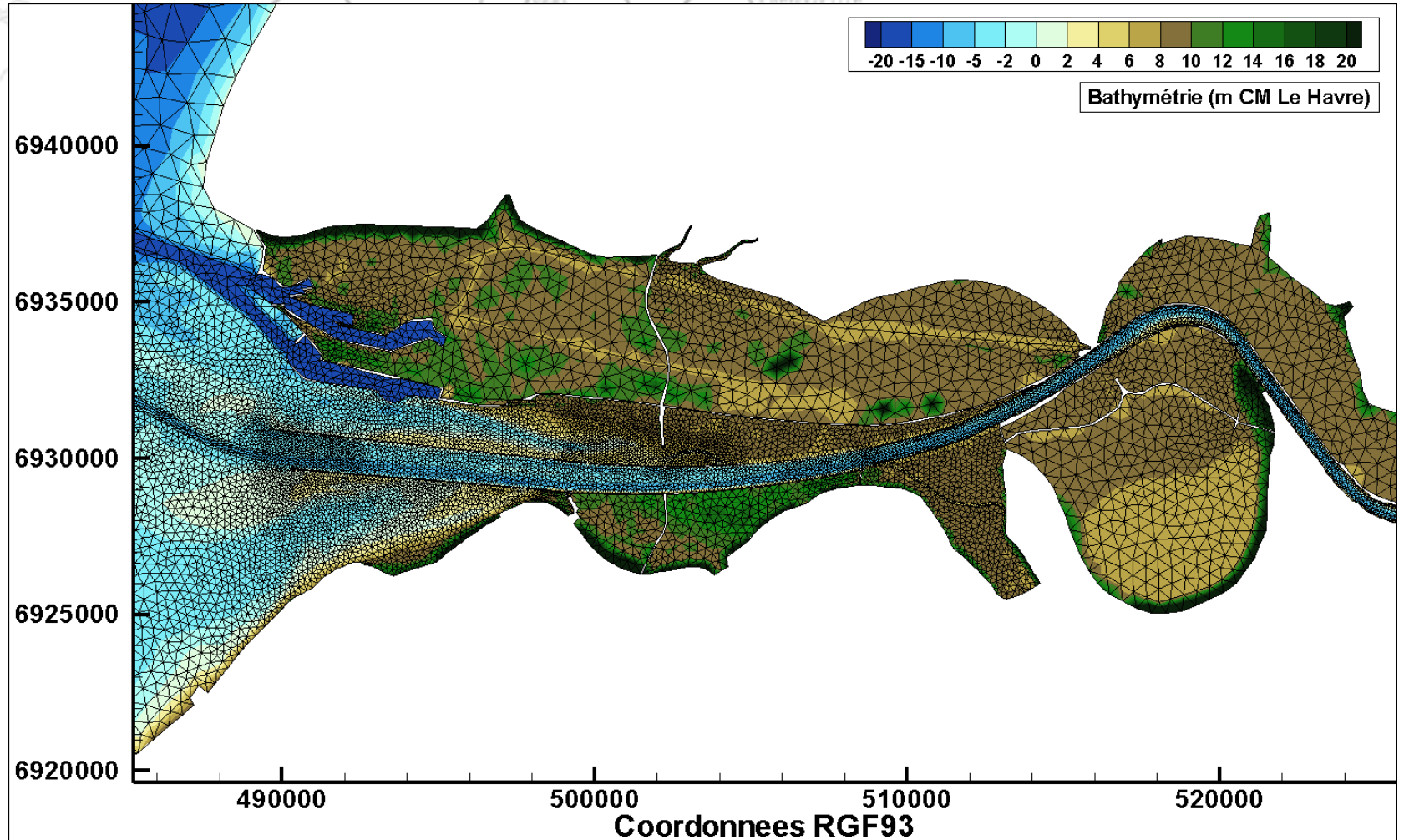
Découpage en sous-modèles – Poses



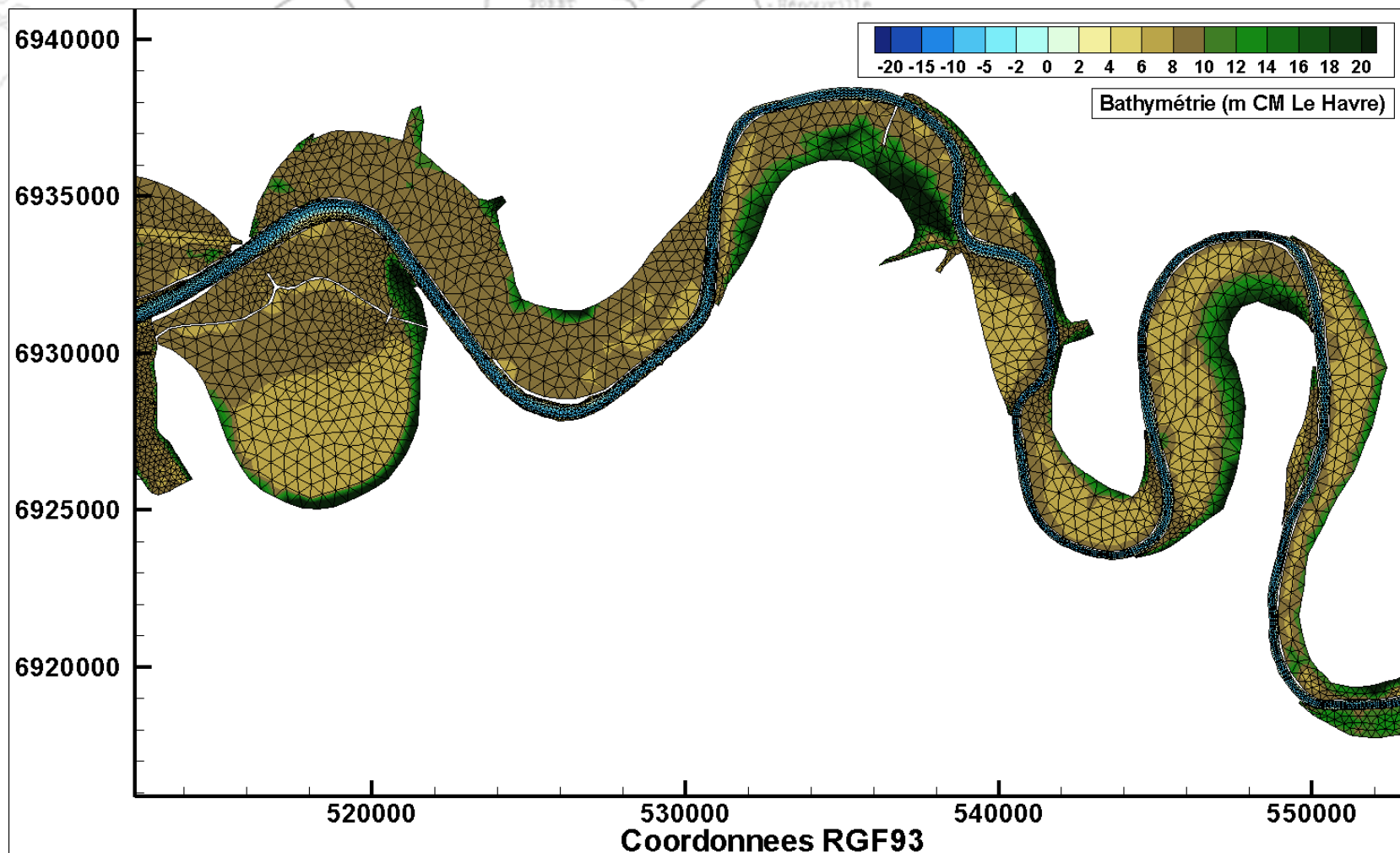
Emprise globale du modèle et bathymétrie



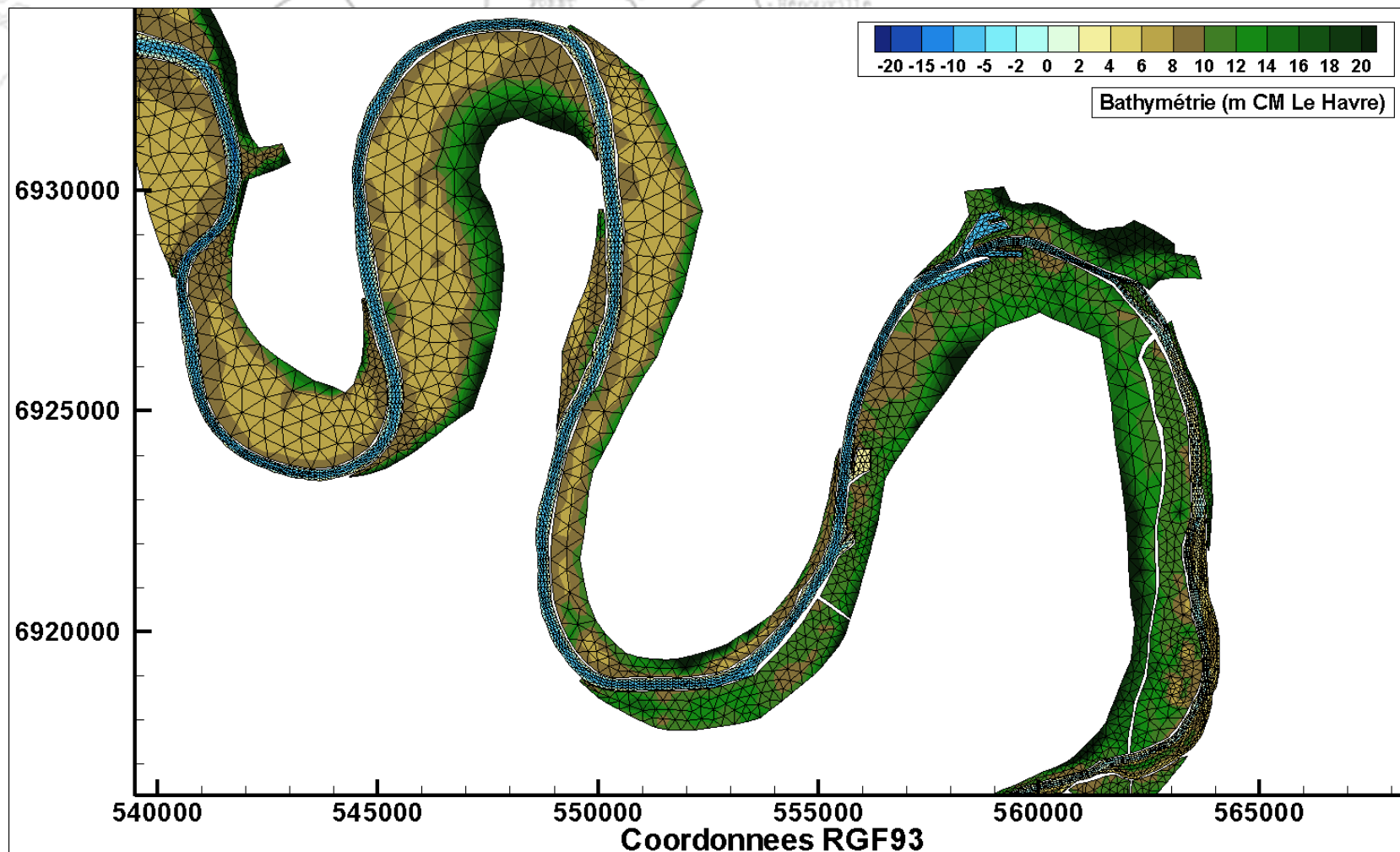
Modèle Numérique de Terrain au voisinage du Havre



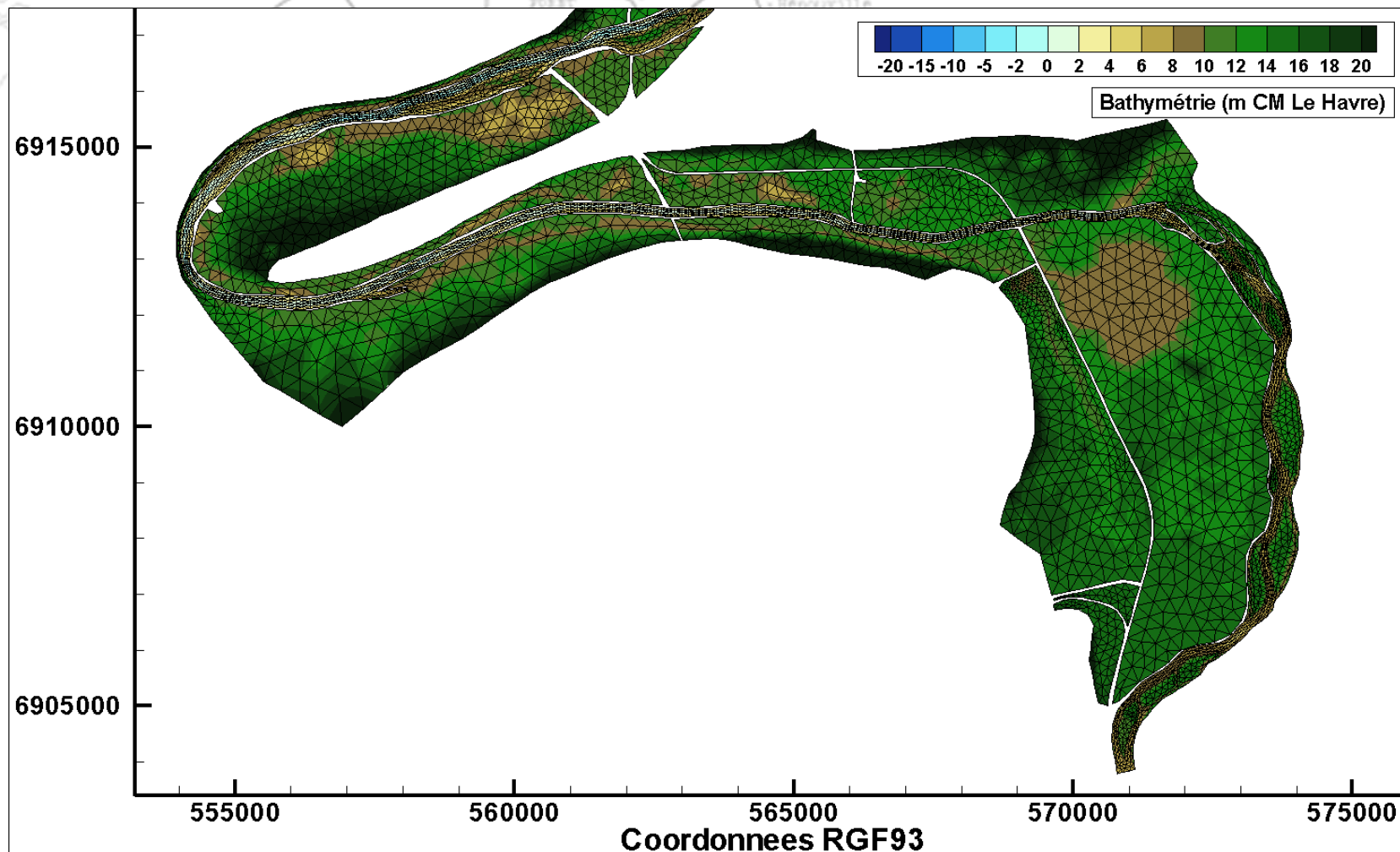
Modèle Numérique de Terrain de Tancarville à La Bouille



Modèle Numérique de Terrain au voisinage de Rouen



Modèle Numérique de Terrain au voisinage de Poses



ANNEXE D

Résultats de calage

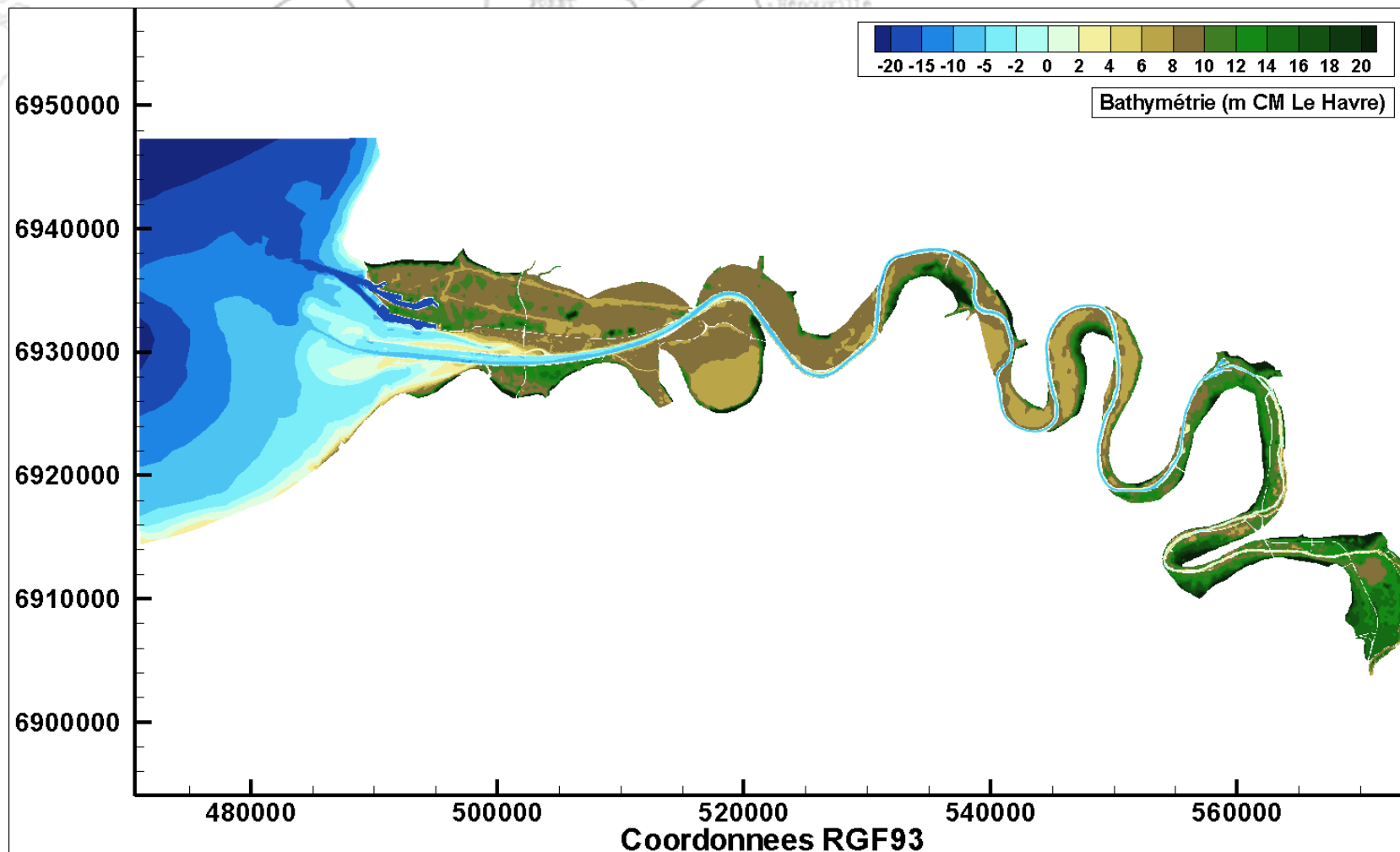


GROUPEMENT D'INTERET PUBLIC SEINE AVAL

Modèle numérique bidimensionnel de l'estuaire de la Seine

Résultats de calage

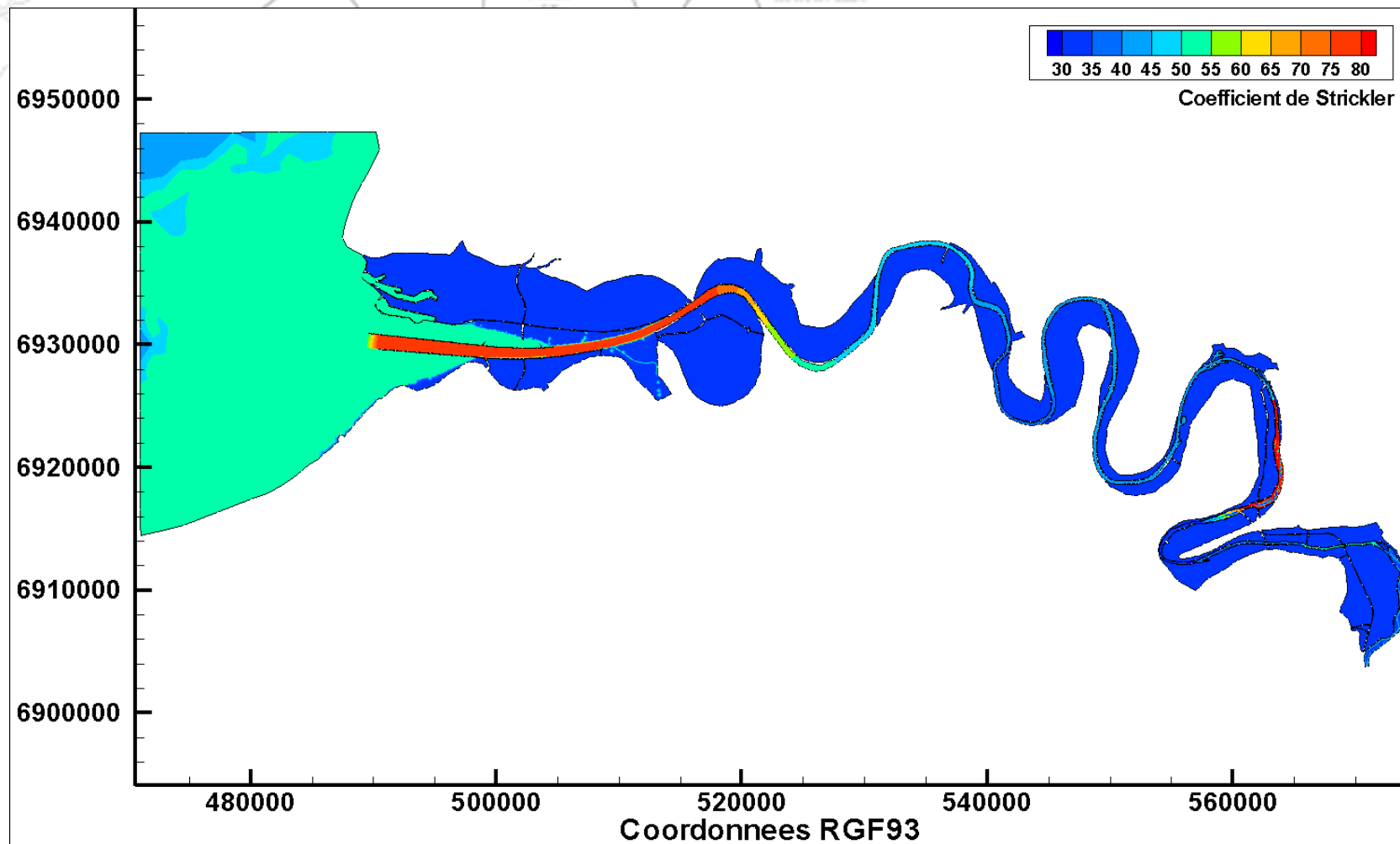
Emprise globale du modèle et bathymétrie



Evénements de calage

Année de l'événement	1995	2001	2008 10 mars	2008 21 mars	2010	2013
Type d'événement	Crue – Fort coefficient de marée	Crue	Tempête – Fort coefficient de marée	Tempête – Fort coefficient de marée	Tempête – Fort coefficient de marée	Crue – Fort coefficient de marée
Débit à Poses (m ³ /s)	2080	2280	579	929	800	1600
Coefficient de marée	104	89	106	105	102	106
Vent max au Cap de la Hève (km/h)	65	54	95	72	50	20
Direction du vent	Sud-ouest	Sud-sud-ouest	Sud-ouest	Ouest	Ouest-nord-ouest	Nord-nord-ouest
Niveau d'eau maximal à Rouen (m CMH)	9,69	9,60	9,12	9,17	9,33	9,38
Niveau d'eau maximal au Havre (m CMH)	8,50	7,98	8,80	8,35	NC	8,39

Carte de frottement retenue



Méthode d'évaluation de l'erreur

Variable	Explication
Erreur	L'erreur est définie comme la différence entre les valeurs obtenues par TELEMAC r et les données d : $e_i = r_i - d_i$
MAE	Erreur Absolue Moyenne $MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i $
Ecart type	Ecart type (SD) $SD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (e_i - \bar{e})^2}$
CF(X)	Fraction (pourcentage) d'erreurs compris dans l'intervalle $[-X; X]$
POF(X)	Fraction (pourcentage) d'erreurs supérieures à X
NOF(-X)	Fraction (pourcentage) d'erreurs inférieures à $-X$

Evaluation de l'erreur – événement 10 mars 2008

Marées du 9 au 11 mars

X = 0.1m	Le Havre	Balise A	Honfleur	Fatouville	Tancarville	Saint Leonard	Aizier	Vatteville	Caudebec	Heurteauville
Nb valeurs	369	354	377	379	317	312	424	421	418	365
MAE (m)	0.05	0.03	0.03	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
Ecart type (m)	0.056	0.048	0.048	0.098	0.089	0.087	0.083	0.083	0.084	0.095
CF(X)	88.6	95.2	96.8	84.4	89.6	88.5	87.0	84.8	85.2	80.3
POF(X)	10.6	2.0	1.6	7.4	3.8	4.5	2.6	9.7	6.5	6.0
NOF(-X)	0.8	2.8	1.6	8.2	6.6	7.1	10.4	5.5	8.4	13.7
POF(2X)	0.5	0.0	0.3	2.4	0.6	0.0	0.0	1.0	0.0	2.5
NOF(-2X)	0.0	0.3	0.5	1.8	2.5	2.2	2.4	1.7	3.3	4.4
Marée du 10 mars										
MAE (m)	0.06	0.03	0.04	0.11	0.07	0.08	0.05	0.07	0.07	0.06
CF(X)	81.4	94.0	95.4	71.9	86.0	77.3	88.0	71.2	76.3	91.5

Marées du 9 au 11 mars

X = 0.1m	Mesnil sous Jumiege	Duclair	Val des Leux	La Bouille	Petit Couronne	Rouen	Oissel	Elbeuf	Pont de l arche
Nb valeurs	397	397	407	443	413	415	413	406	366
MAE (m)	0.06	0.05	0.04	0.03	0.04	0.03	0.06	0.08	0.05
Ecart type (m)	0.090	0.071	0.054	0.044	0.044	0.038	0.067	0.087	0.071
CF(X)	82.1	84.6	88.5	93.9	91.3	96.4	79.7	62.6	84.2
POF(X)	16.4	13.1	9.6	4.3	8.5	2.2	20.3	0.5	15.0
NOF(-X)	1.5	2.3	2.0	1.8	0.2	1.4	0.0	36.9	0.8
POF(2X)	10.6	3.8	0.0	0.0	0.0	0.0	6.3	0.0	3.3
NOF(-2X)	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	8.9	0.0
Marée du 10 mars									
MAE (m)	0.07	0.05	0.03	0.02	0.03	0.01	0.05	0.08	0.05
CF(X)	78.9	82.7	97.4	98.7	100.0	100.0	80.8	64.8	86.8

Evaluation de l'erreur – événement 21 mars 2008

Marées du 20 au 22 mars

X = 0.1m	Le Havre	Balise A	Honfleur	Fatouville	Tancarville	Saint Leonard	Aizier	Vatteville	Caudebec	Heurteauville
Nb valeurs	430	374	379	365	418	281	424	427	430	437
MAE (m)	0.08	0.04	0.05	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.08	0.11
Ecart type (m)	0.081	0.061	0.072	0.106	0.104	0.104	0.113	0.117	0.111	0.168
CF(X)	70.5	91.2	83.4	74.8	70.1	72.2	67.5	62.1	68.1	58.8
POF(X)	28.6	4.0	10.8	4.9	11.2	9.3	11.3	9.8	12.1	16.7
NOF(-X)	0.9	4.8	5.8	20.3	18.7	18.5	21.2	28.1	19.8	24.5
POF(2X)	6.5	0.5	0.8	0.3	1.4	1.4	1.4	0.2	4.0	8.0
NOF(-2X)	0.0	0.3	0.8	11.2	5.7	5.0	8.0	10.3	4.7	8.9
Marée du 21 mars										
MAE (m)	0.08	0.04	0.04	0.06	0.05	0.06	0.04	0.04	0.04	0.15
CF(X)	72.6	92.0	93.4	85.3	78.7	80.0	92.6	89.2	89.0	68.2

Marées du 20 au 22 mars

X = 0.1m	Mesnil sous Jumiege	Duclair	Val des Leux	La Bouille	Petit Couronne	Rouen	Oissel	Elbeuf	Pont de l arche
Nb valeurs	435	431	424	433	431	433	433	368	359
MAE (m)	0.10	0.08	0.07	0.08	0.08	0.09	0.13	0.09	0.10
Ecart type (m)	0.126	0.117	0.111	0.110	0.117	0.124	0.127	0.117	0.118
CF(X)	61.8	71.0	72.6	73.4	73.8	61.7	52.9	58.7	60.7
POF(X)	32.4	19.3	21.2	23.8	22.5	20.8	47.1	25.3	39.3
NOF(-X)	5.7	9.7	6.1	2.8	3.7	17.6	0.0	16.0	0.0
POF(2X)	15.9	10.0	11.6	16.9	17.2	13.6	29.1	9.8	18.1
NOF(-2X)	1.1	3.0	1.9	1.2	1.9	2.8	0.0	0.3	0.0
Marée du 21 mars									
MAE (m)	0.09	0.04	0.04	0.06	0.05	0.04	0.13	0.12	0.08
CF(X)	47.1	100.0	87.0	74.7	79.8	84.2	49.0	56.3	63.5

Evaluation de l'erreur – événement 2010

Marées du 27 février au 1 mars

X = 0.1m	Le Havre	Balise A	Honfleur	Fatouville	Tancarville	Saint Leonard	Aizier	Vatteville	Caudebec	Heurteauville
Nb valeurs	400	426	421	359	410	389	415	408	398	352
MAE (m)	0.04	0.06	0.04	0.07	0.07	0.06	0.07	0.06	0.08	0.06
Ecart type (m)	0.048	0.070	0.053	0.104	0.112	0.084	0.108	0.091	0.097	0.109
CF(X)	95.3	82.6	93.8	76.0	78.0	83.3	78.3	84.1	70.9	82.7
POF(X)	1.8	15.7	3.8	15.9	3.4	3.1	14.5	2.5	0.0	1.1
NOF(-X)	3.0	1.6	2.4	8.1	18.5	13.6	7.2	13.5	29.1	16.2
POF(2X)	0.0	4.2	0.0	2.8	0.2	0.3	5.8	0.0	0.0	0.3
NOF(-2X)	0.0	0.2	0.2	2.8	7.1	3.6	1.4	4.9	11.8	6.3
Marée du 28 février										
MAE (m)	0.05	0.04	0.04	0.12	0.13	0.06	0.12	0.06	0.13	0.05
CF(X)	97.0	94.1	92.0	49.3	63.8	86.6	61.0	84.8	43.0	84.8

Marées du 27 février au 1 mars

X = 0.1m	Mesnil sous Jumiege	Duclair	Val des Leux	La Bouille	Petit Couronne	Rouen	Oissel	Elbeuf	Pont de l arche
Nb valeurs	447	440	447	441	435	437	430	423	403
MAE (m)	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02	0.05	0.02	0.08	0.07
Ecart type (m)	0.075	0.063	0.048	0.042	0.039	0.063	0.033	0.087	0.077
CF(X)	78.3	90.0	93.3	94.3	96.1	85.6	98.4	60.0	77.7
POF(X)	15.7	1.6	0.0	0.2	0.5	0.0	1.6	10.6	14.6
NOF(-X)	6.0	8.4	6.7	5.4	3.4	14.4	0.0	29.3	7.7
POF(2X)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NOF(-2X)	0.9	2.0	0.9	0.2	0.0	3.4	0.0	0.0	0.0
Marée du 28 février									
MAE (m)	0.07	0.07	0.03	0.02	0.01	0.03	0.02	0.08	0.06
CF(X)	67.4	78.3	97.8	98.9	98.9	98.9	100.0	55.7	83.7

Evaluation de l'erreur – événement 2001

Marées du 27 au 29 mars

X = 0.1m	Le Havre	Balise A	Honfleur	Fatouville	Tancarville	Saint Leonard	Aizier	Vatteville	Caudebec	Heurteauville
Nb valeurs	445	398	445	439	442	444	444	448	446	450
MAE (m)	0.04	0.04	0.03	0.04	0.07	0.05	0.04	0.08	0.07	0.07
Ecart type (m)	0.045	0.043	0.047	0.063	0.088	0.069	0.061	0.097	0.089	0.091
CF(X)	93.7	96.7	94.8	91.1	76.5	84.7	89.9	66.5	73.1	71.1
POF(X)	6.3	2.8	1.3	1.4	0.2	11.9	0.9	32.4	26.2	24.7
NOF(-X)	0.0	0.5	3.8	7.5	23.3	3.4	9.2	1.1	0.7	4.2
POF(2X)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	15.4	8.7	6.0
NOF(-2X)	0.0	0.0	0.2	1.4	6.3	0.5	2.3	0.0	0.0	0.4
Marée du 28 mars										
MAE (m)	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.07	0.03	0.12	0.10	0.08
CF(X)	87.0	90.8	88.5	94.8	94.9	78.2	97.4	49.4	53.2	65.0

Marées du 27 au 29 mars

X = 0.1m	Mesnil sous Jumiege	Duclair	Val des Leux	La Bouille	Petit Couronne	Rouen	Oissel	Elbeuf	Pont de l arche
Nb valeurs	453	452	0	449	448	455	336	0	0
MAE (m)	0.08	0.07	N/A	0.08	0.06	0.06	0.04	N/A	N/A
Ecart type (m)	0.079	0.075	N/A	0.080	0.075	0.081	0.058	N/A	N/A
CF(X)	69.8	73.0	N/A	66.4	80.4	71.6	91.4	N/A	N/A
POF(X)	30.0	27.0	N/A	33.6	19.6	8.8	8.6	N/A	N/A
NOF(-X)	0.2	0.0	N/A	0.0	0.0	19.6	0.0	N/A	N/A
POF(2X)	7.9	6.4	N/A	8.2	4.2	2.0	1.5	N/A	N/A
NOF(-2X)	0.0	0.0	N/A	0.0	0.0	0.0	0.0	N/A	N/A
Marée du 28 mars									
MAE (m)	0.11	0.10	N/A	0.10	0.07	0.04	0.03	N/A	N/A
CF(X)	40.7	48.8	N/A	43.0	74.7	82.5	100.0	N/A	N/A

Evaluation de l'erreur – événement 1995

Marées du 1 au 3 février

X = 0.1m	Le Havre	Balise A	Honfleur	La Risle	Tancarville	Saint Leonard	Aizier	Vatteville	Caudebec	Heurteauville
Nb valeurs	446	446	439	229	436	435	440	442	444	444
MAE (m)	0.04	0.04	0.06	0.09	0.05	0.06	0.05	0.05	0.05	0.06
Ecart type (m)	0.046	0.051	0.074	0.101	0.078	0.097	0.080	0.082	0.085	0.087
CF(X)	93.7	92.6	79.0	63.8	85.3	80.7	84.1	86.0	82.9	81.1
POF(X)	6.1	6.3	1.6	3.9	7.6	13.3	10.0	4.8	8.6	13.5
NOF(-X)	0.2	1.1	19.4	32.3	7.1	6.0	5.9	9.3	8.6	5.4
POF(2X)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.7	3.2	2.0	4.3	4.5
NOF(-2X)	0.0	0.0	3.4	9.2	1.4	3.0	1.4	3.4	2.0	1.1
Marée du 1 février										
MAE (m)	0.06	0.07	0.04	N/A	0.09	0.13	0.09	0.07	0.09	0.11
CF(X)	74.1	67.1	92.7	N/A	57.5	46.8	57.5	76.8	61.4	58.3

Marées du 1 au 3 février

X = 0.1m	Mesnil sous Jumiege	Duclair	Val des Leux	La Bouille	Petit Couronne	Rouen	Oissel	Elbeuf	Pont de l arche
Nb valeurs	450	449	450	450	440	450	461	475	0
MAE (m)	0.07	0.03	0.04	0.03	0.08	0.06	0.27	0.15	N/A
Ecart type (m)	0.067	0.056	0.055	0.045	0.102	0.073	0.062	0.038	N/A
CF(X)	76.2	90.2	88.9	95.1	68.0	75.1	0.0	9.5	N/A
POF(X)	23.8	4.7	10.2	4.4	26.4	8.9	100.0	0.0	N/A
NOF(-X)	0.0	5.1	0.9	0.4	5.7	16.0	0.0	90.5	N/A
POF(2X)	4.2	0.2	1.6	0.0	8.2	0.0	93.5	0.0	N/A
NOF(-2X)	0.0	1.1	0.0	0.0	1.6	1.3	0.0	12.2	N/A
Marée du 1 février									
MAE (m)	0.12	0.04	0.09	0.05	0.12	0.08	0.30	0.15	N/A
CF(X)	45.3	80.5	60.0	79.3	54.3	60.5	0.0	12.2	N/A

Evaluation de l'erreur – événement 2013

Marées du 9 au 11 février

X = 0.1m	Le Havre	Balise A	Honfleur	Fatouville	Tancarville	Saint Leonard	Aizier	Vatteville	Caudebec	Heurteauville
Nb valeurs	420	0	415	374	422	417	428	433	408	441
MAE (m)	0.04	N/A	0.05	0.10	0.06	0.06	0.05	0.06	0.05	0.04
Ecart type (m)	0.055	N/A	0.061	0.121	0.078	0.080	0.072	0.079	0.069	0.062
CF(X)	97.4	N/A	88.2	63.6	82.2	79.9	86.9	79.7	80.6	87.1
POF(X)	1.7	N/A	1.4	3.2	2.4	1.7	7.9	17.3	14.2	7.3
NOF(-X)	1.0	N/A	10.4	33.2	15.4	18.5	5.1	3.0	5.1	5.7
POF(2X)	0.0	N/A	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.9	0.2	0.0
NOF(-2X)	0.2	N/A	0.2	16.6	1.2	1.9	0.7	1.6	0.5	0.9
Marée du 10 février										
MAE (m)	0.03	N/A	0.06	0.11	0.07	0.06	0.05	0.06	0.05	0.04
CF(X)	98.8	N/A	77.9	65.3	77.9	75.0	87.0	77.9	83.3	90.0

Marées du 9 au 11 février

X = 0.1m	Mesnil sous Jumiege	Duclair	Val des Leux	La Bouille	Petit Couronne	Rouen	Oissel	Elbeuf	Pont de l arche
Nb valeurs	241	232	363	370	373	376	388	380	362
MAE (m)	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.03	0.06	0.05
Ecart type (m)	0.054	0.052	0.047	0.035	0.035	0.050	0.037	0.062	0.048
CF(X)	94.2	93.5	91.5	96.8	98.7	89.6	95.1	93.9	99.7
POF(X)	0.4	1.7	0.3	0.3	1.1	0.0	4.9	1.6	0.0
NOF(-X)	5.4	4.7	8.3	3.0	0.3	10.4	0.0	4.5	0.3
POF(2X)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NOF(-2X)	2.9	1.3	0.3	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0
Marée du 10 février									
MAE (m)	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.06	0.04
CF(X)	96.8	100.0	91.9	100.0	100.0	95.8	92.1	93.8	100.0

Evaluation de l'erreur – événement 2010 vent renforcé

Marées du 27 février au 1 mars

X = 0.1m	Le Havre	Balise A	Honfleur	Fatouville	Tancarville	Saint Leonard	Aizier	Vatteville	Caudebec	Heurteauville
Nb valeurs	400	426	421	359	410	389	415	408	398	352
MAE (m)	0.04	0.06	0.04	0.08	0.06	0.06	0.09	0.05	0.06	0.06
Ecart type (m)	0.053	0.074	0.054	0.125	0.095	0.092	0.134	0.089	0.082	0.105
CF(X)	91.8	80.3	91.0	73.0	80.2	80.2	72.0	80.9	83.2	86.9
POF(X)	5.5	17.8	8.1	20.1	6.1	9.8	23.6	10.3	0.0	2.8
NOF(-X)	2.8	1.9	1.0	7.0	13.7	10.0	4.3	8.8	16.8	10.2
POF(2X)	0.0	4.7	0.0	7.8	0.2	1.8	10.8	0.0	0.0	0.3
NOF(-2X)	0.0	0.2	0.0	2.2	3.9	2.6	1.2	2.5	4.8	4.3
Marée du 28 février										
MAE (m)	0.06	0.05	0.03	0.16	0.07	0.09	0.19	0.05	0.07	0.05
CF(X)	77.3	88.2	92.0	50.7	81.2	73.1	50.6	92.4	75.9	87.0

Marées du 27 février au 1 mars

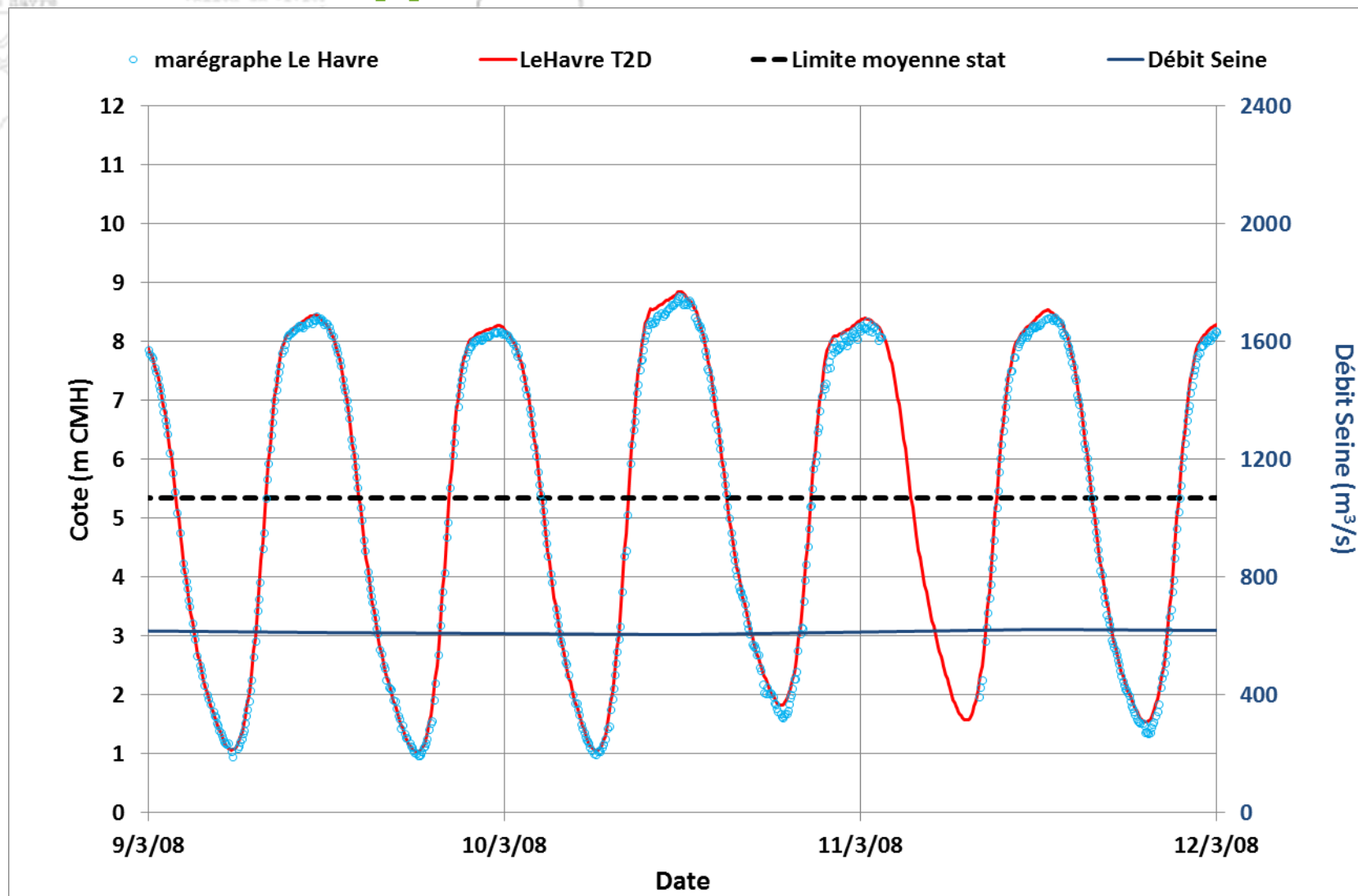
X = 0.1m	Mesnil sous Jumiege	Duclair	Val des Leux	La Bouille	Petit Couronne	Rouen	Oissel	Elbeuf	Pont de l arche
Nb valeurs	447	440	447	441	435	437	430	423	403
MAE (m)	0.07	0.05	0.04	0.04	0.05	0.04	0.06	0.11	0.10
Ecart type (m)	0.085	0.062	0.058	0.056	0.068	0.058	0.080	0.131	0.122
CF(X)	69.1	80.5	87.9	88.2	80.0	89.7	77.4	48.2	56.1
POF(X)	28.0	18.2	8.5	8.6	18.2	3.2	22.3	22.9	28.0
NOF(-X)	2.9	1.4	3.6	3.2	1.8	7.1	0.2	28.8	15.9
POF(2X)	7.8	0.0	0.0	0.2	2.8	0.0	7.2	9.0	9.2
NOF(-2X)	0.7	0.0	0.2	0.0	0.0	1.1	0.0	0.0	0.0
Marée du 28 février									
MAE (m)	0.08	0.06	0.03	0.04	0.06	0.03	0.07	0.15	0.14
CF(X)	65.2	66.3	95.7	89.0	71.4	97.8	74.5	21.6	28.3



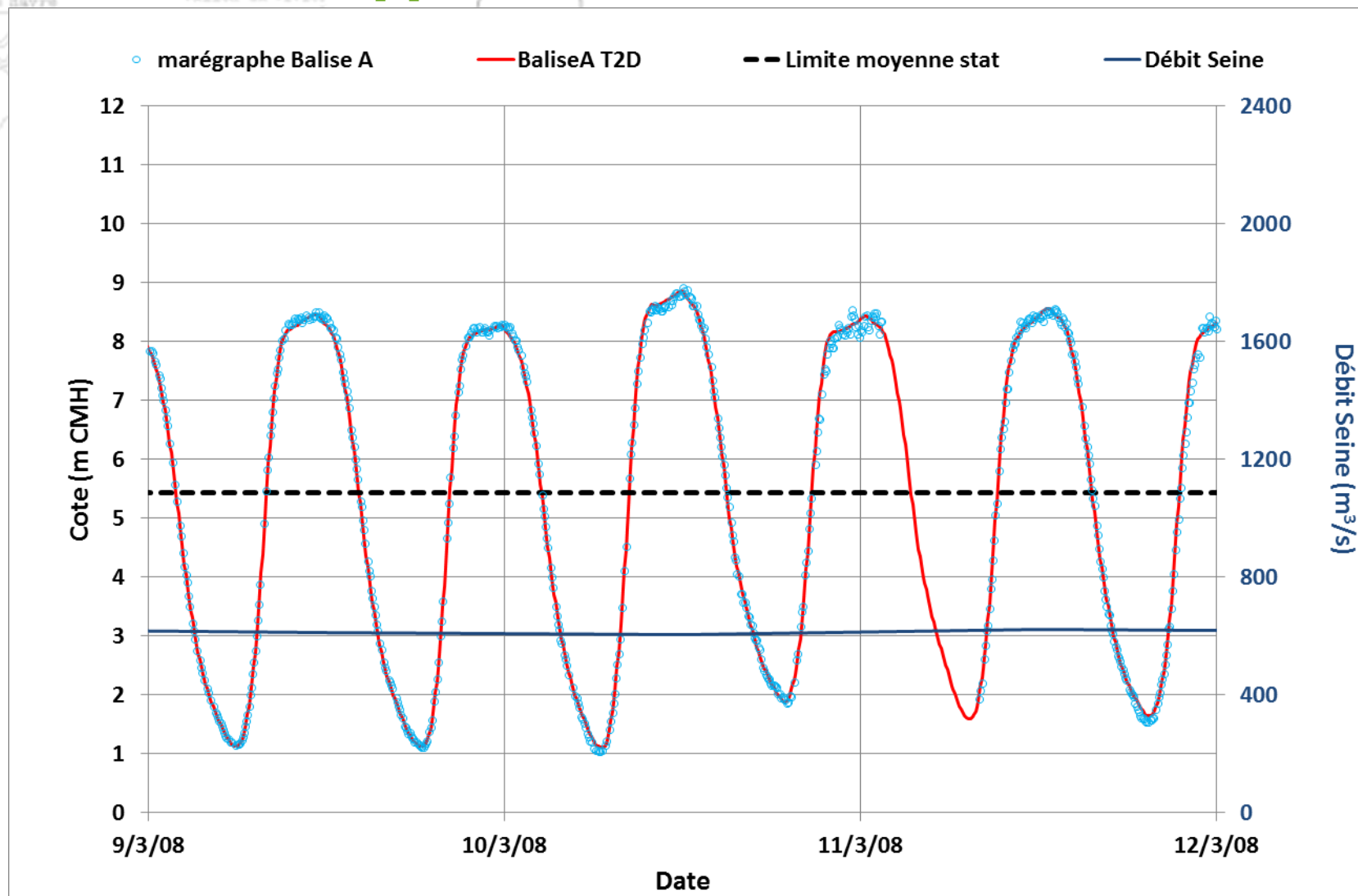
Simulation de tempête 2008

Période du 10 mars

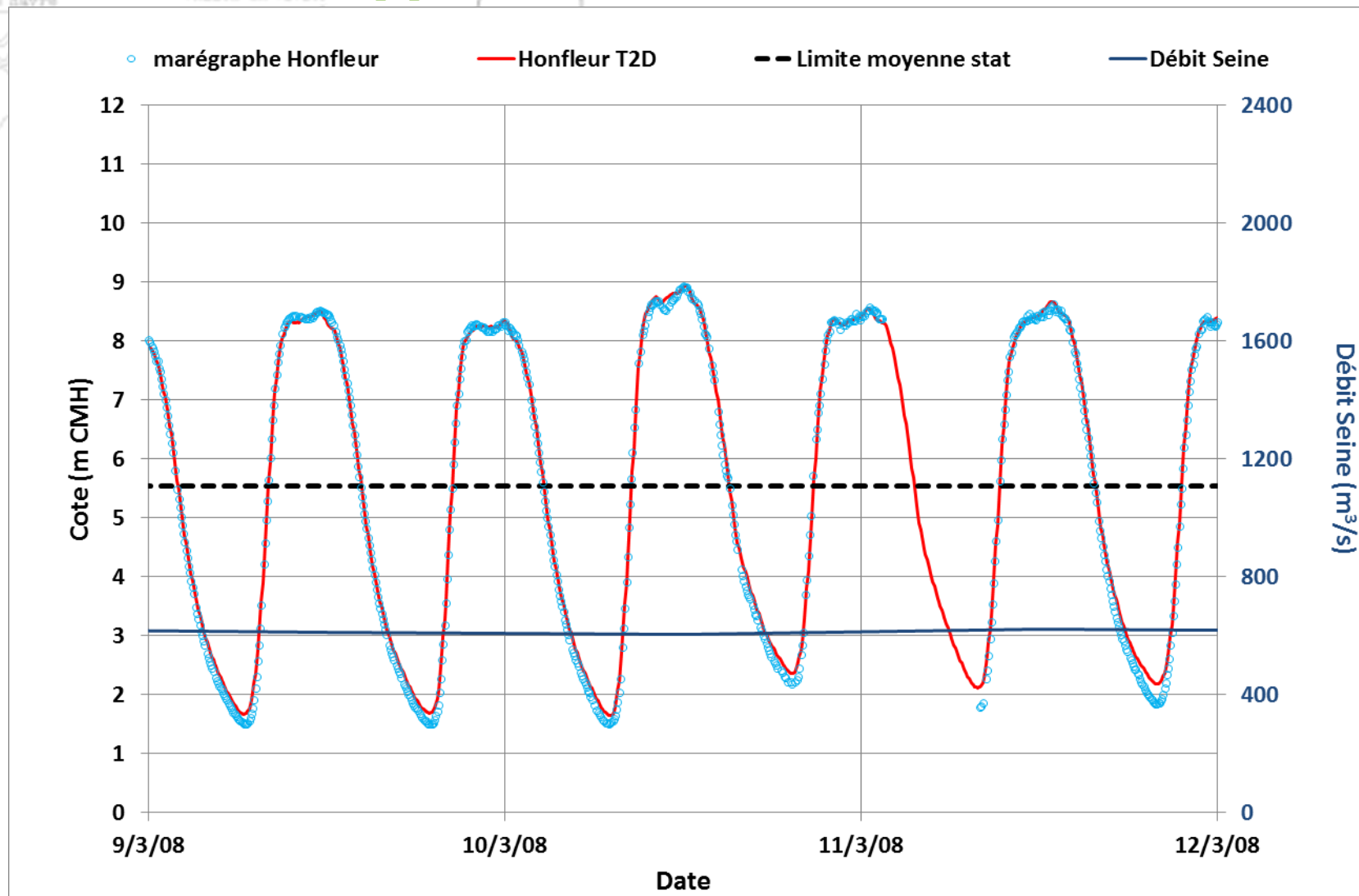
Événement de 2008 [1]: Le Havre



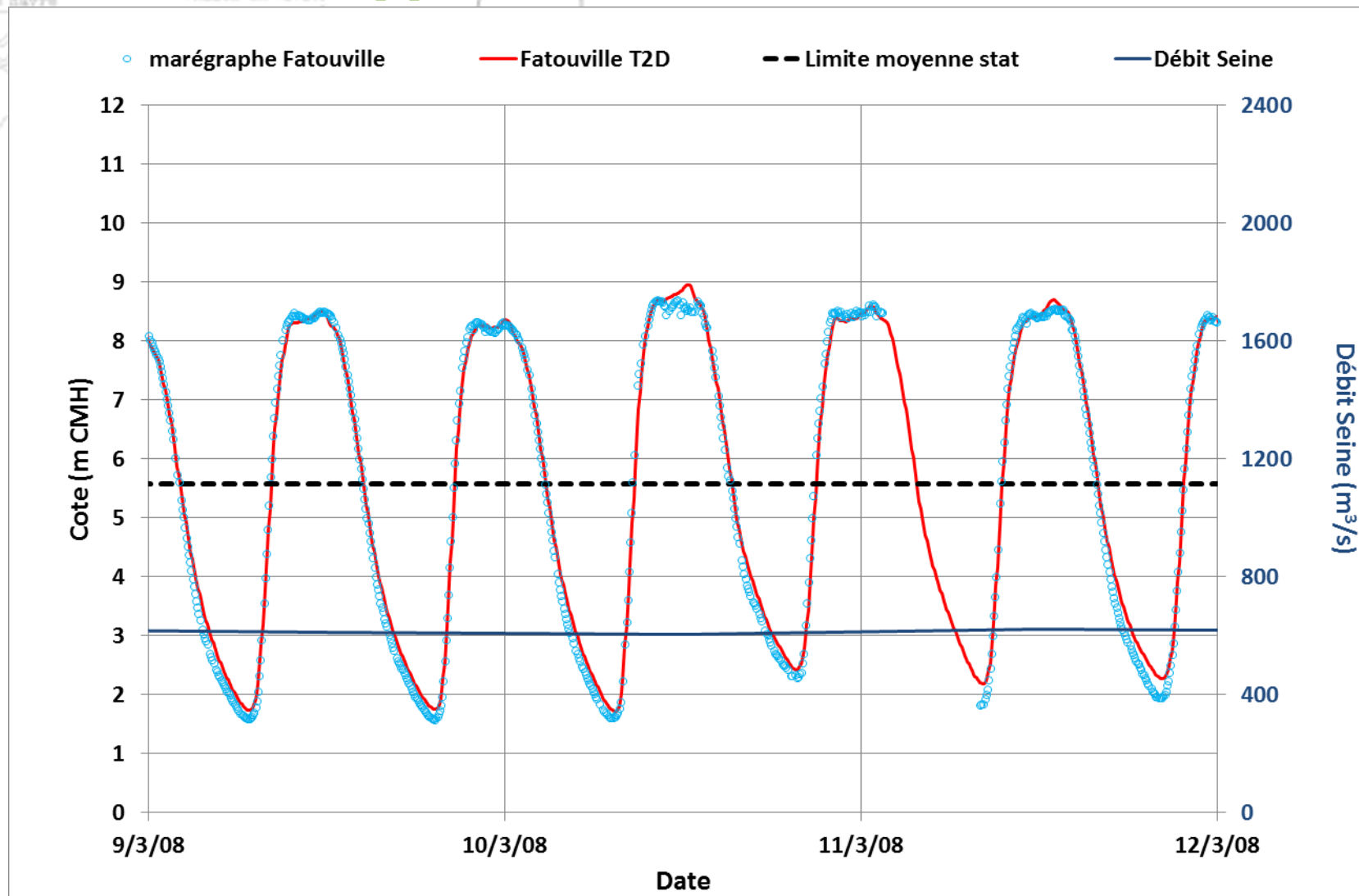
Événement de 2008 [1]: Balise A



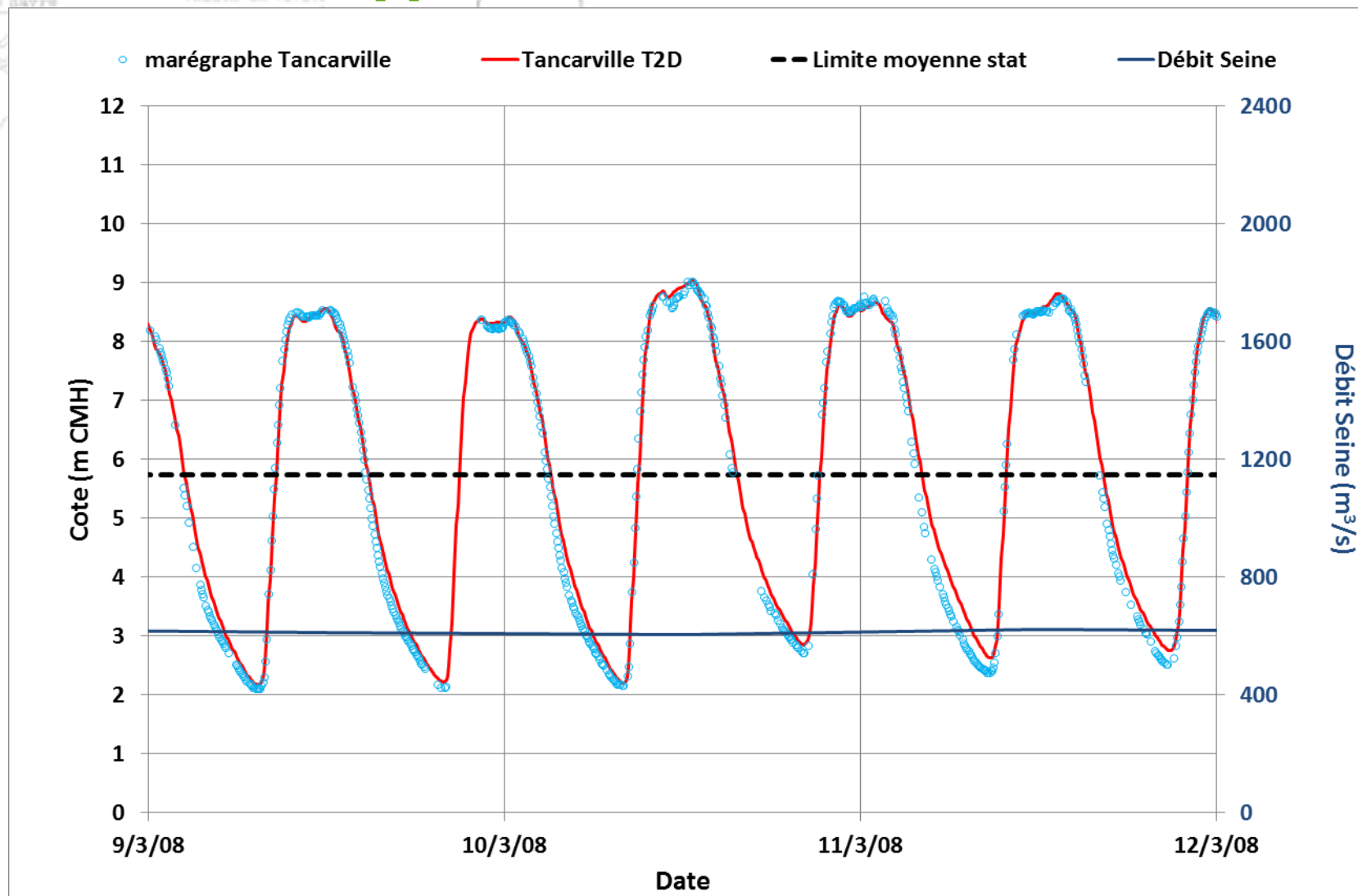
Événement de 2008 [1]: Honfleur



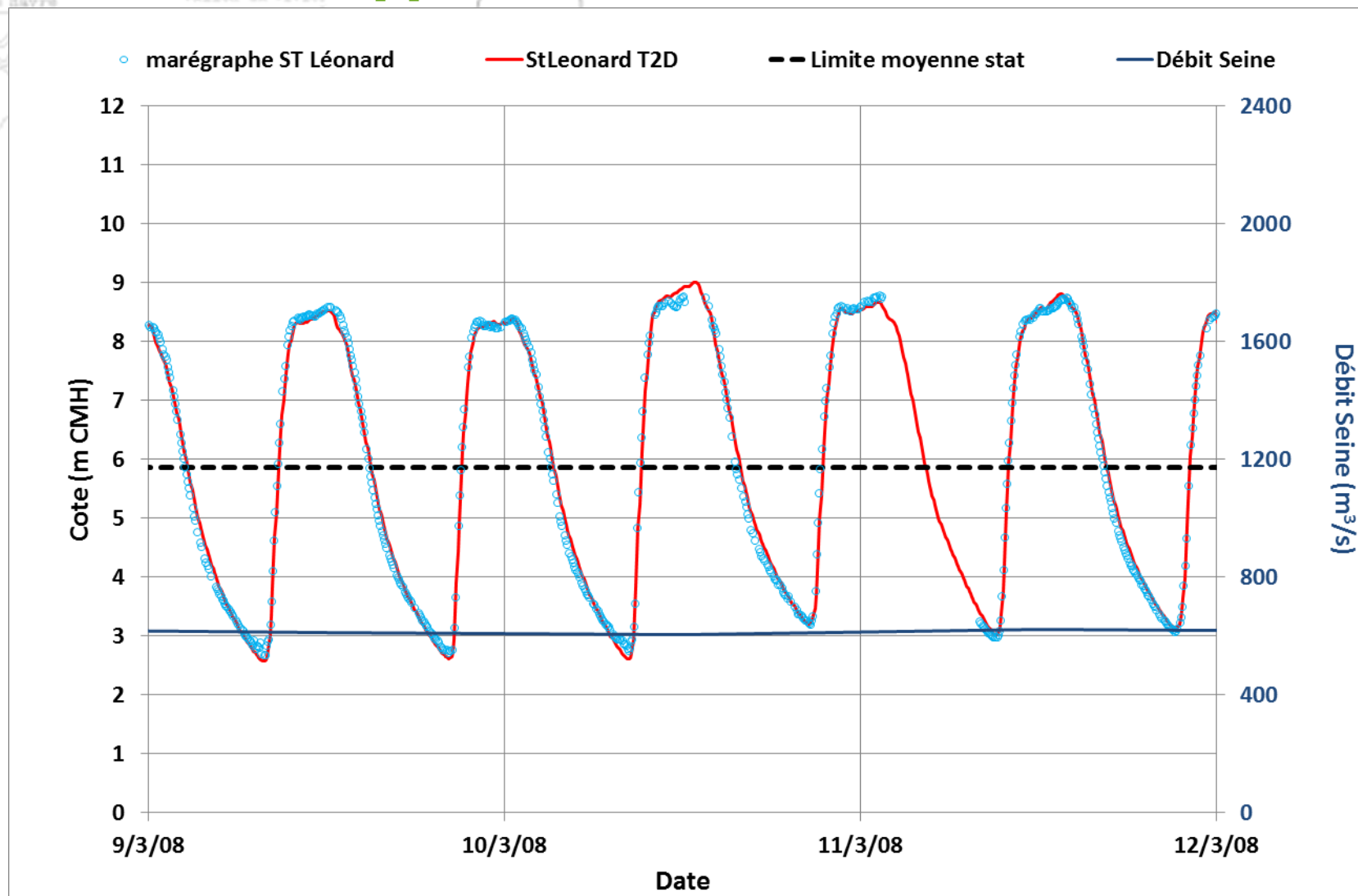
Événement de 2008 [1]: Fatouville



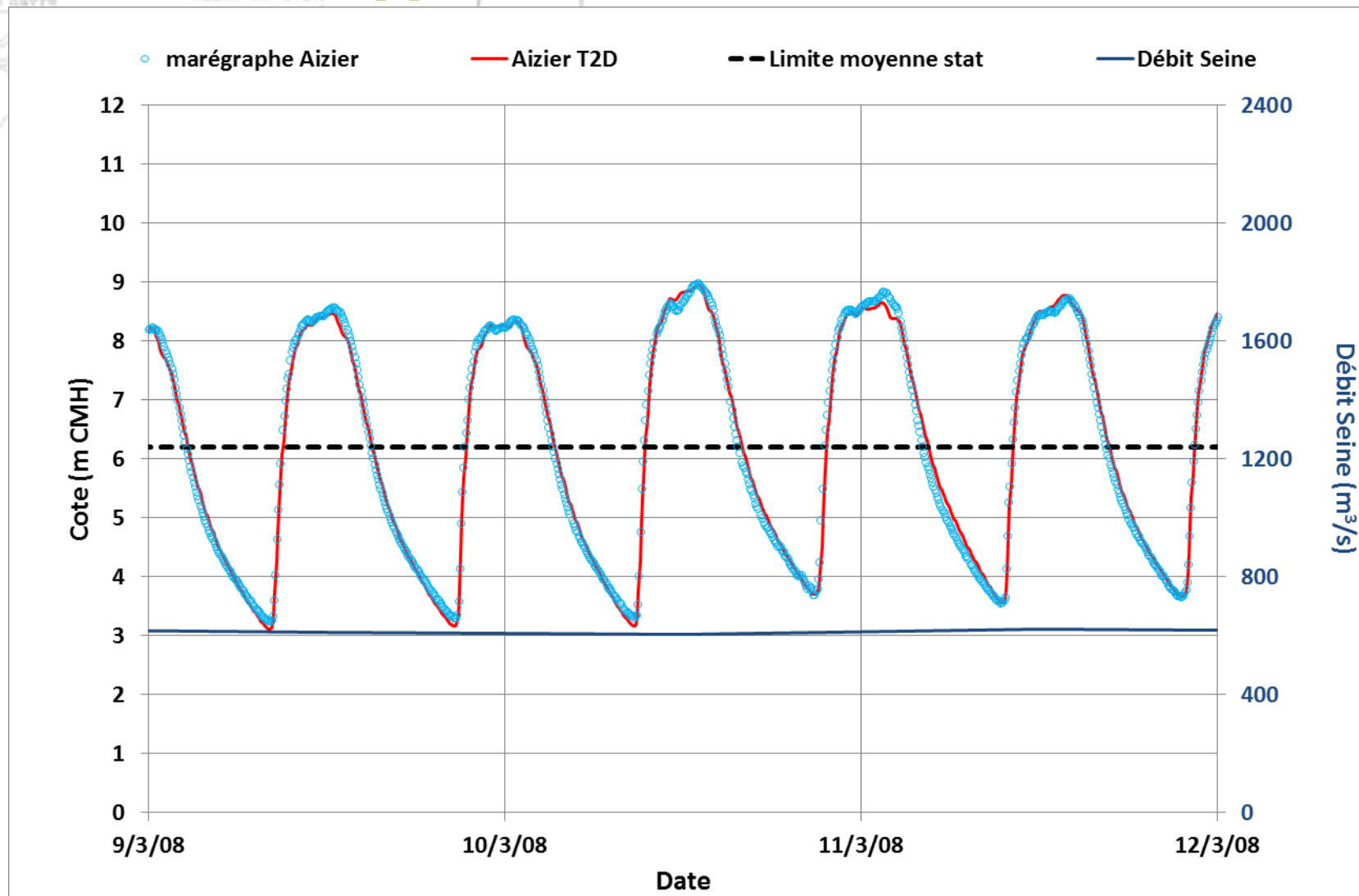
Événement de 2008 [1]: Tancarville



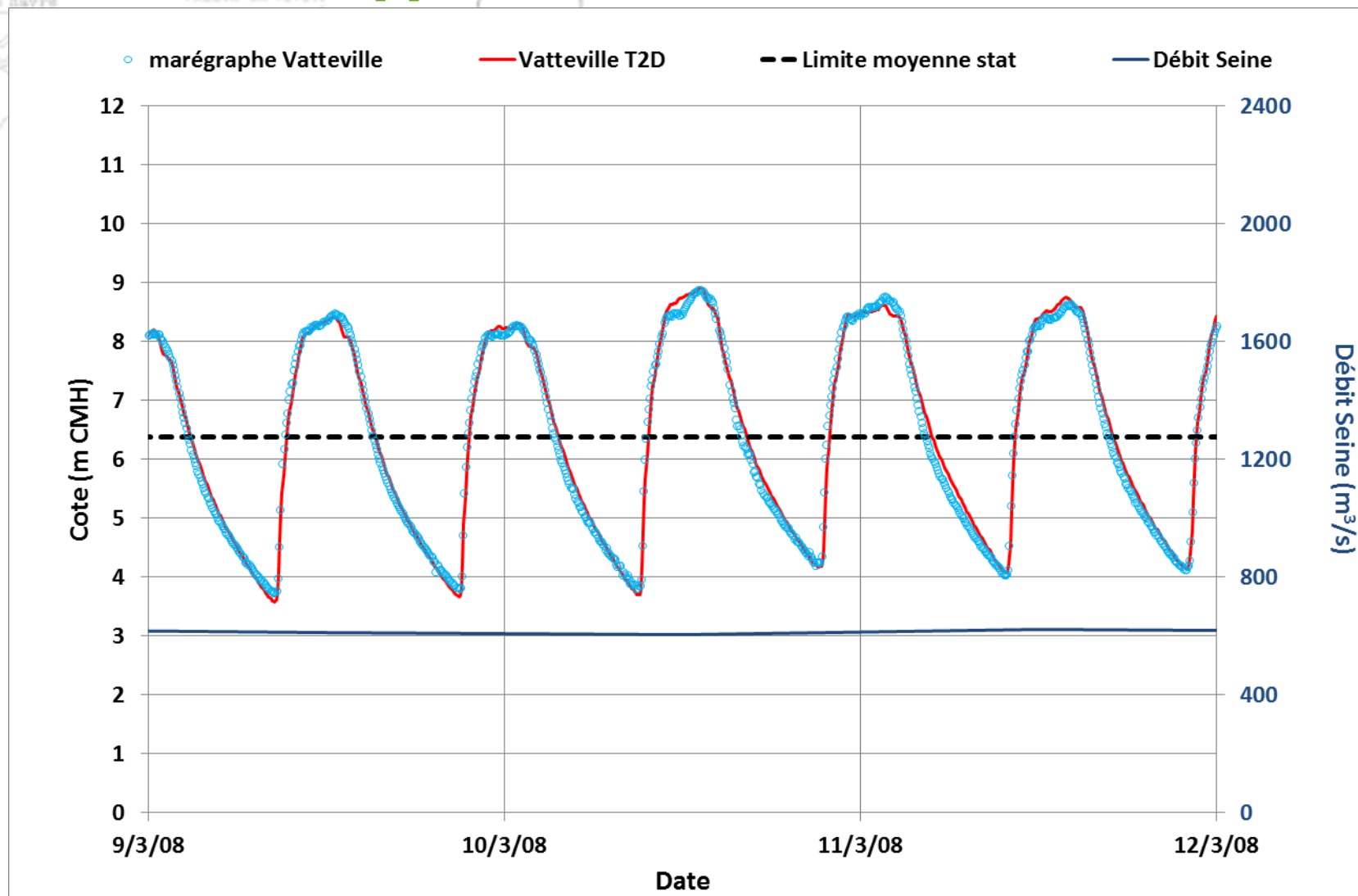
Événement de 2008 [1]: St Léonard



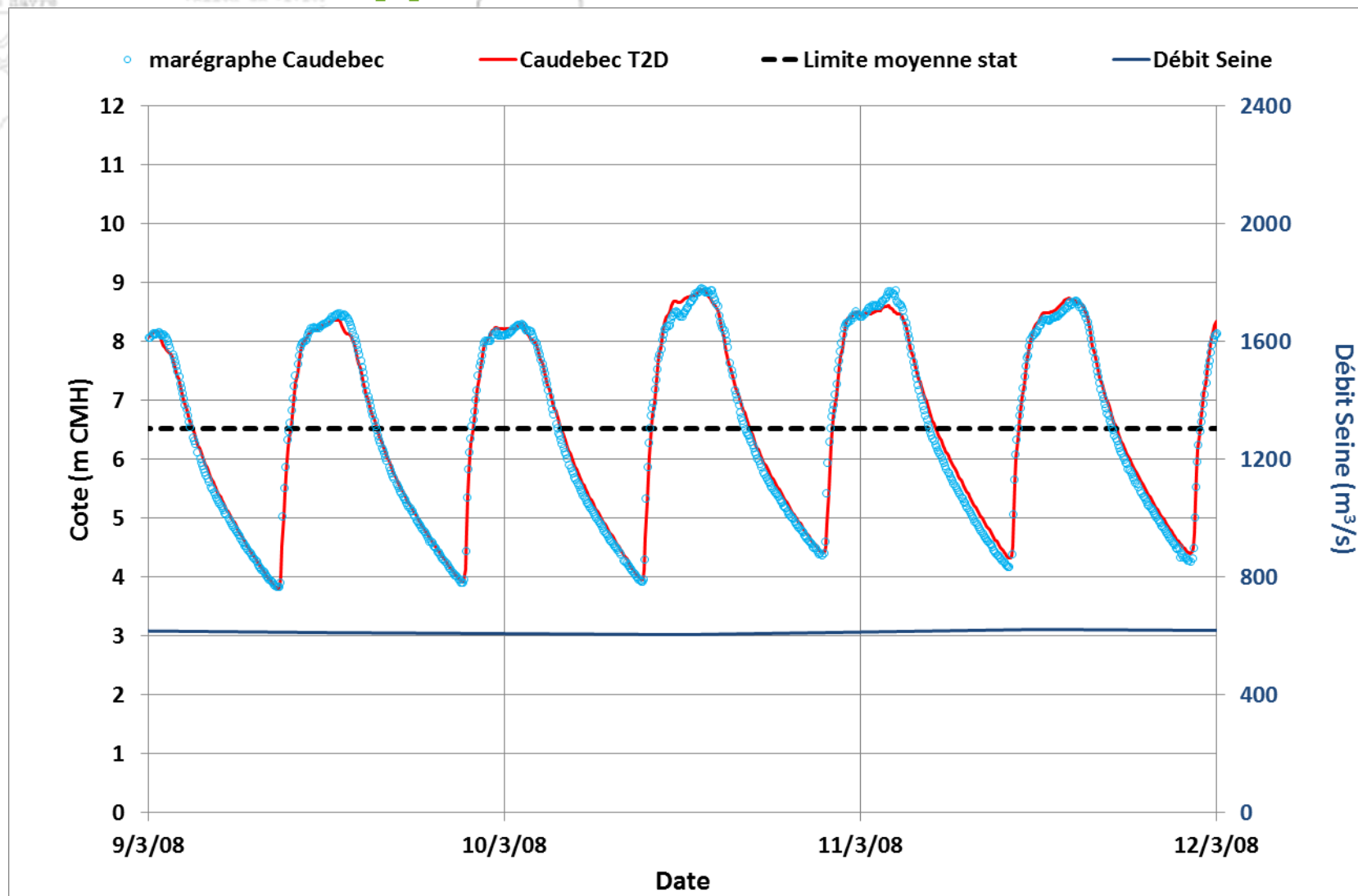
Événement de 2008 [1]: Aizier



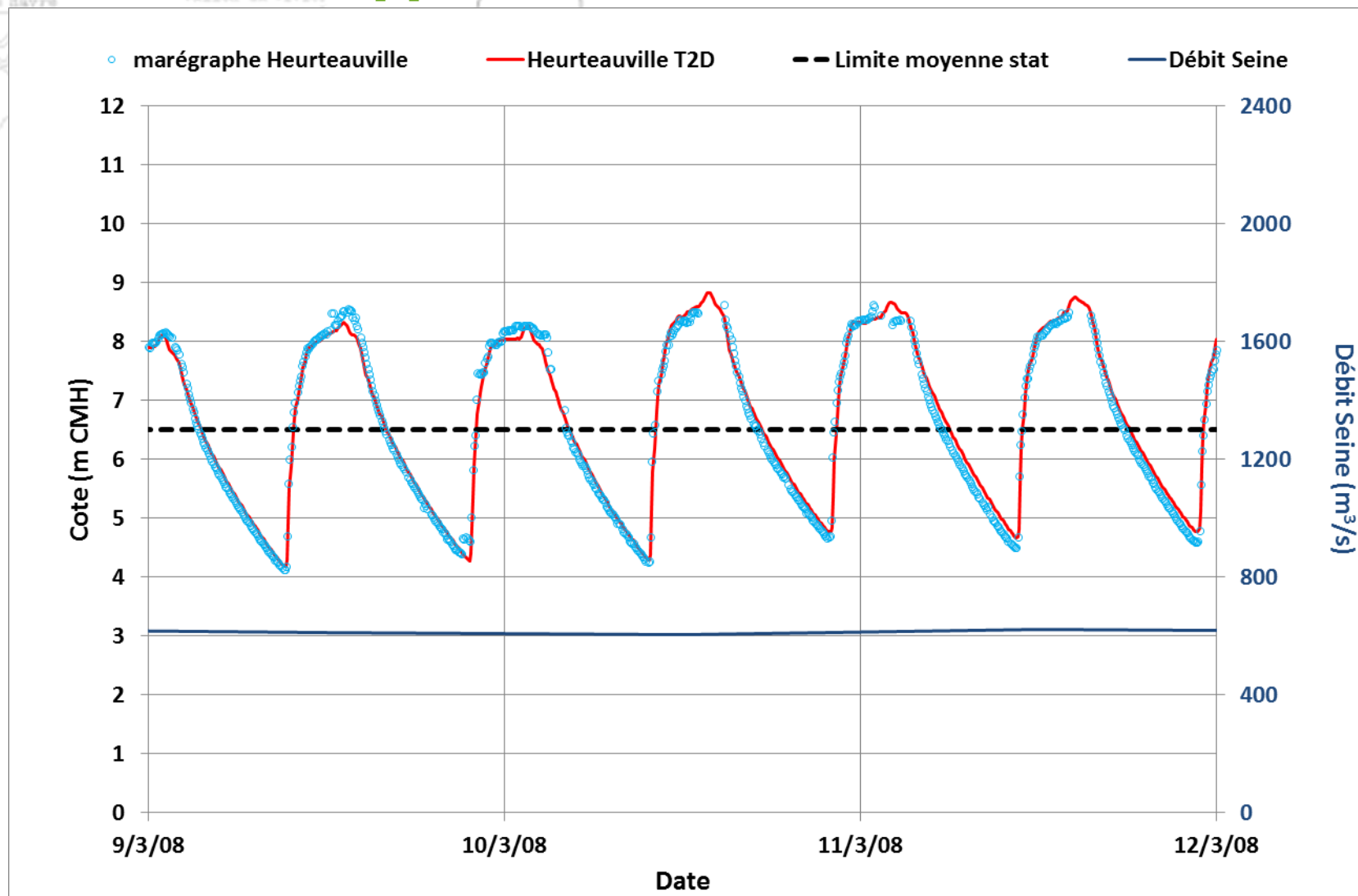
Événement de 2008 [1]: Vatteville



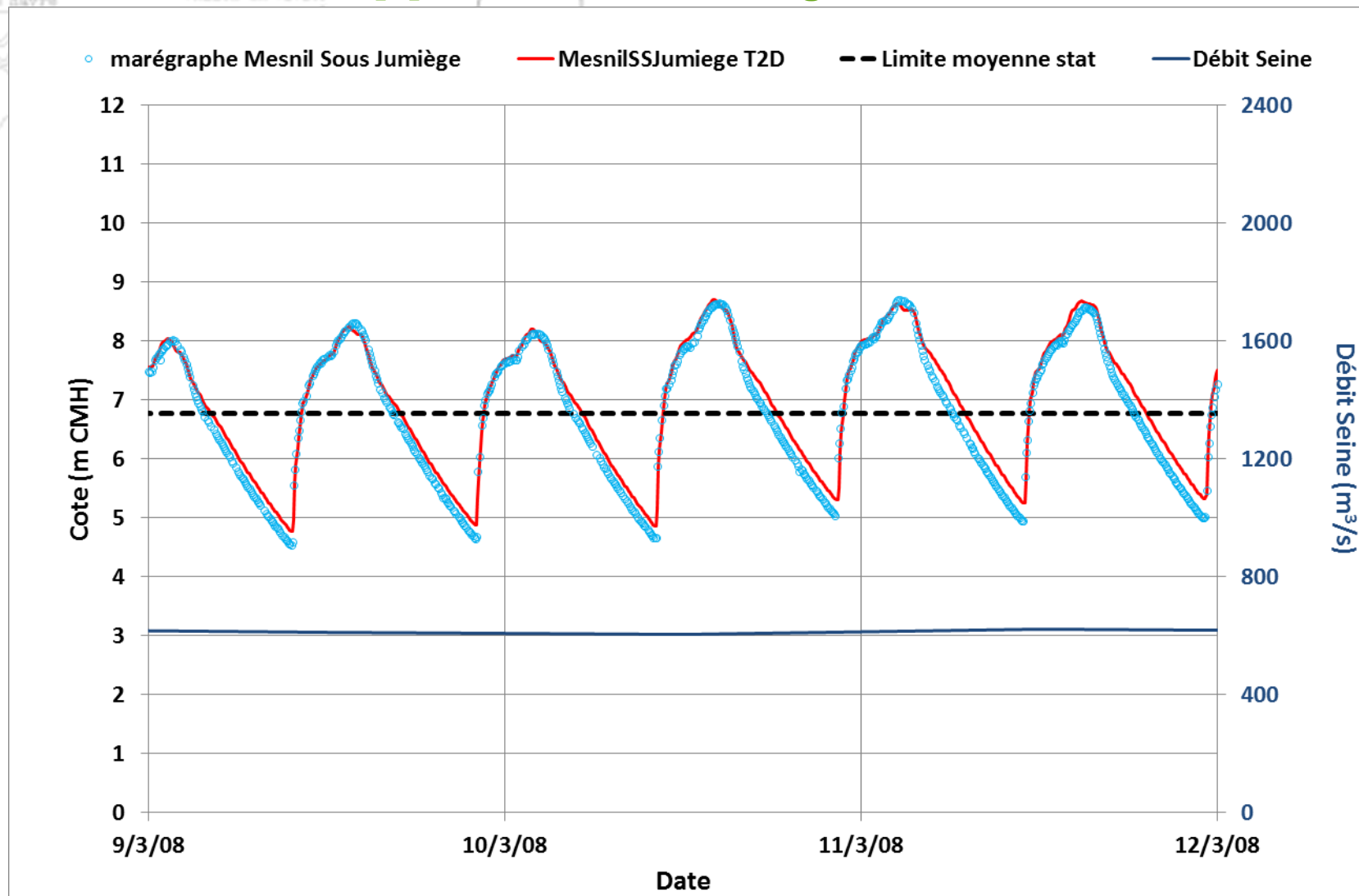
Événement de 2008 [1]: Caudebec



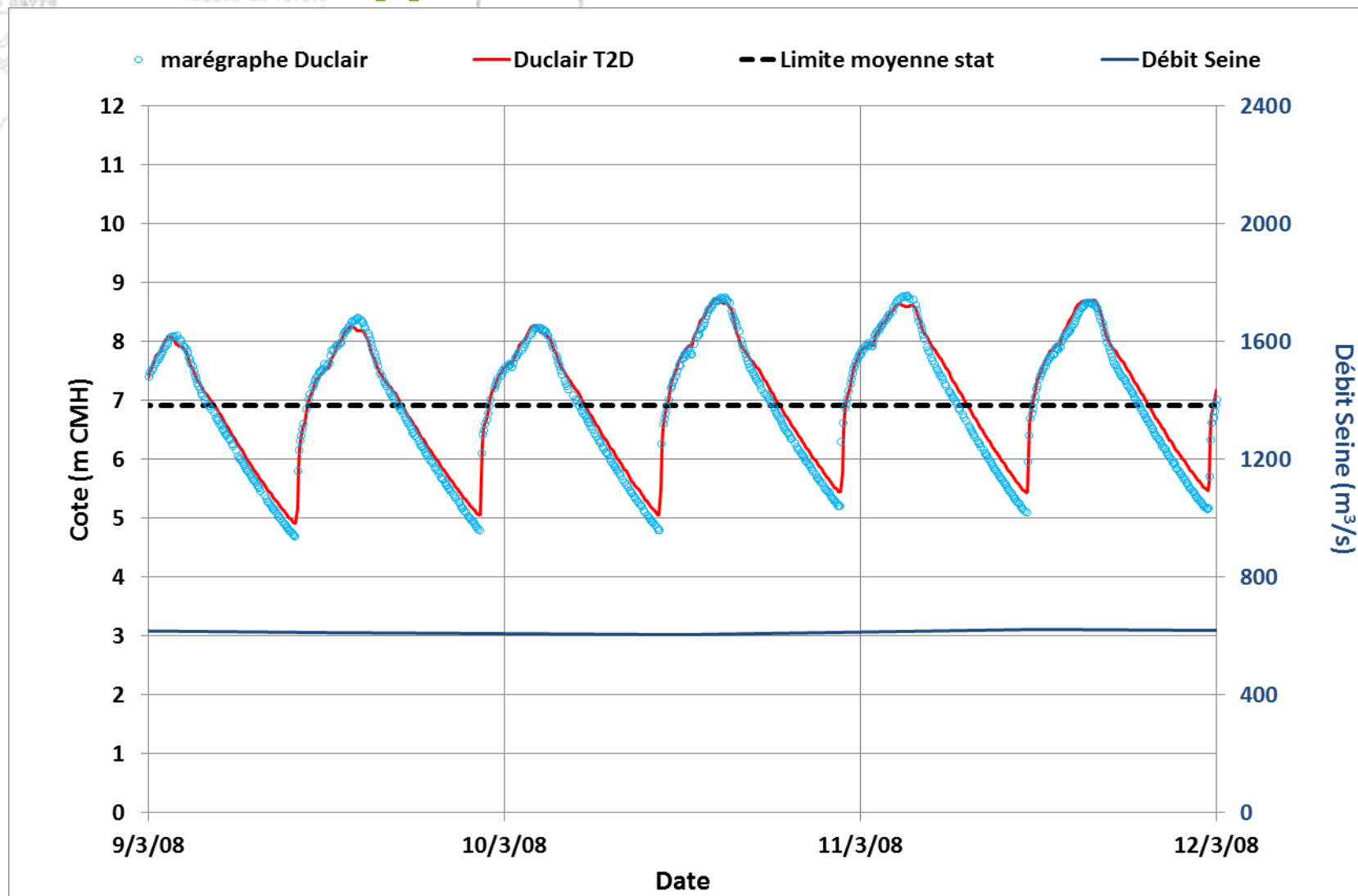
Événement de 2008 [1]: Heurteauville



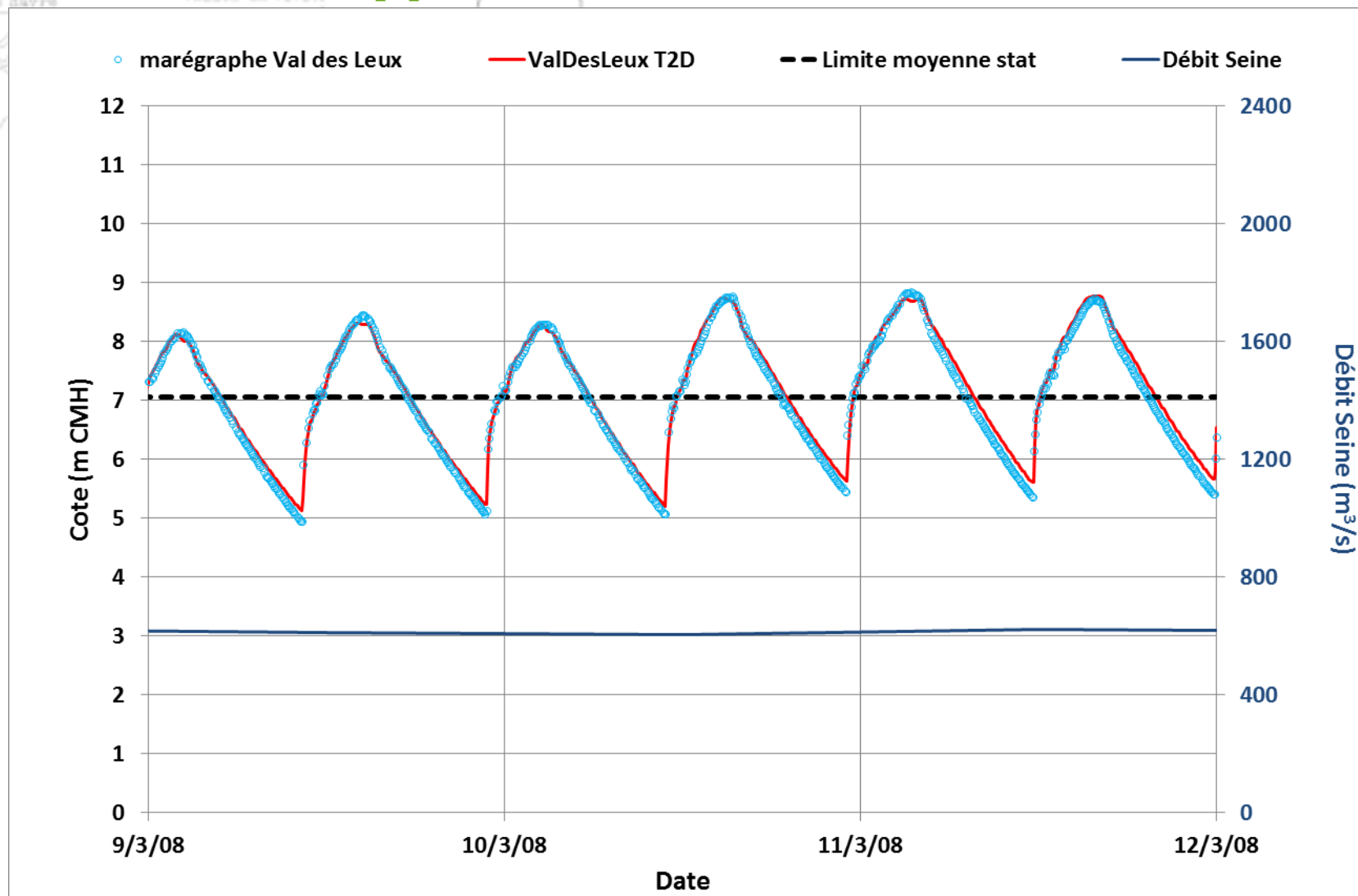
Événement de 2008 [1]: Mesnil-sous-Jumièges



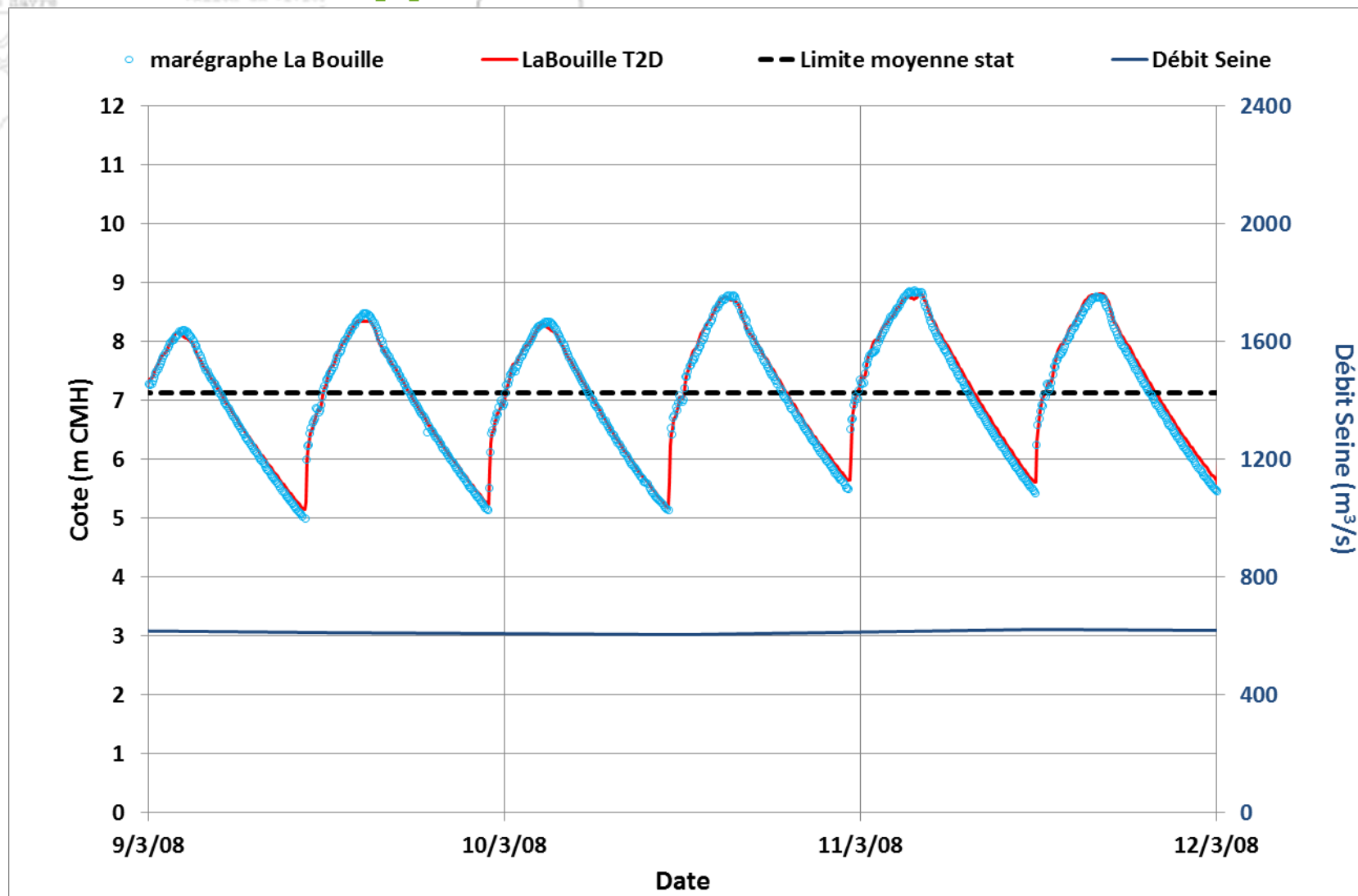
Événement de 2008 [1]: Duclair



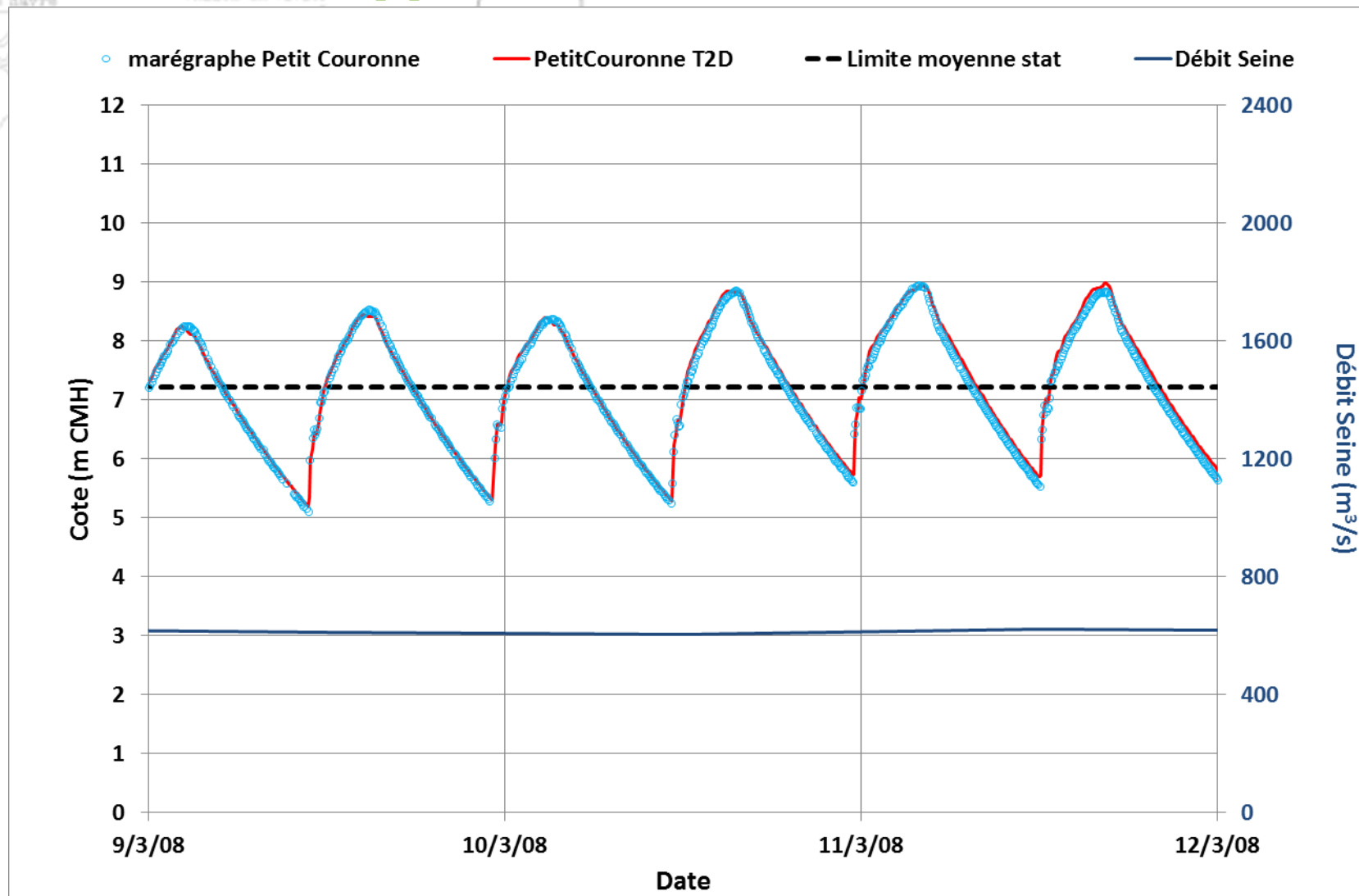
Événement de 2008 [1]: Val-des-Leux



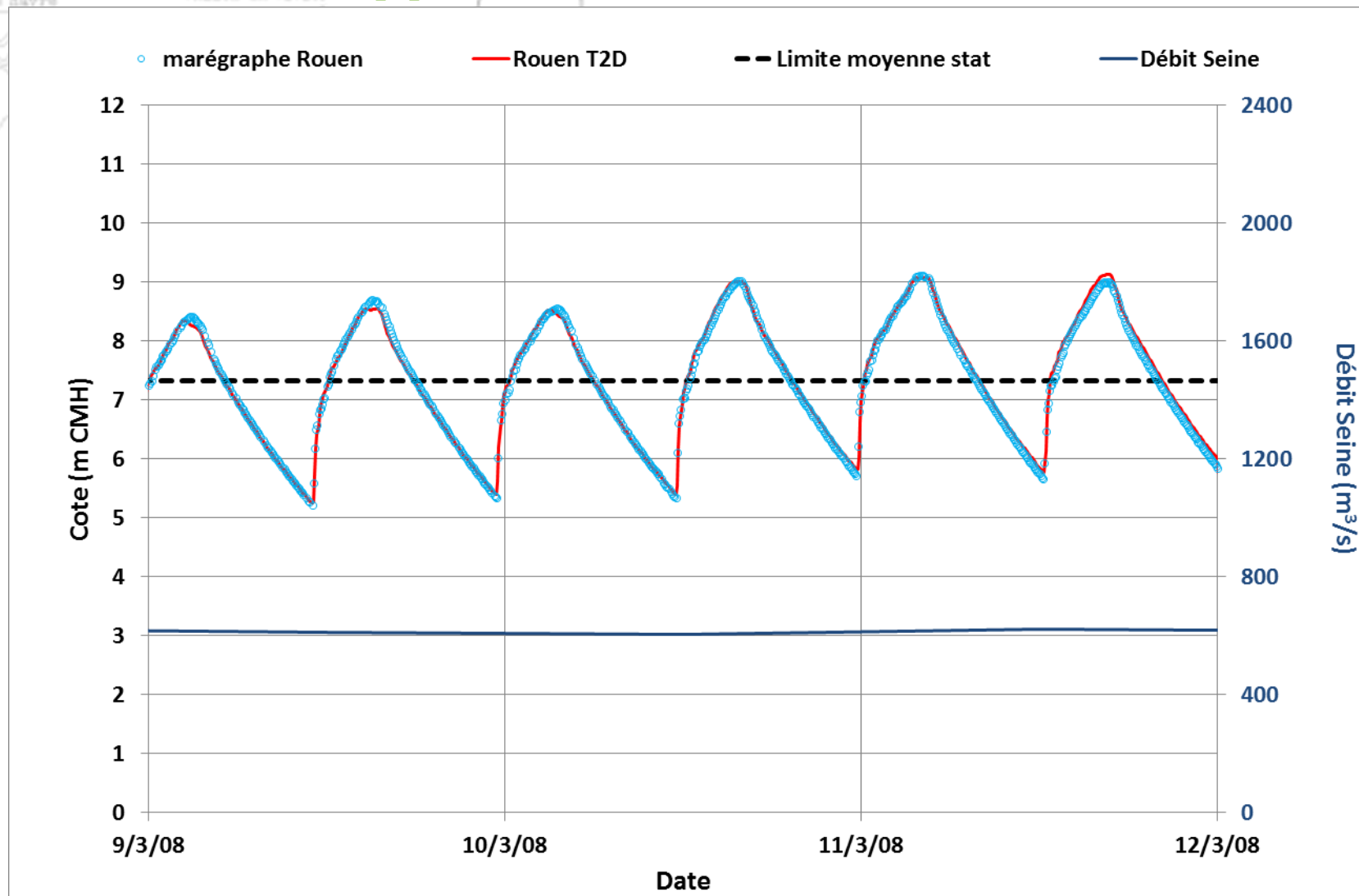
Événement de 2008 [1]: La Bouille



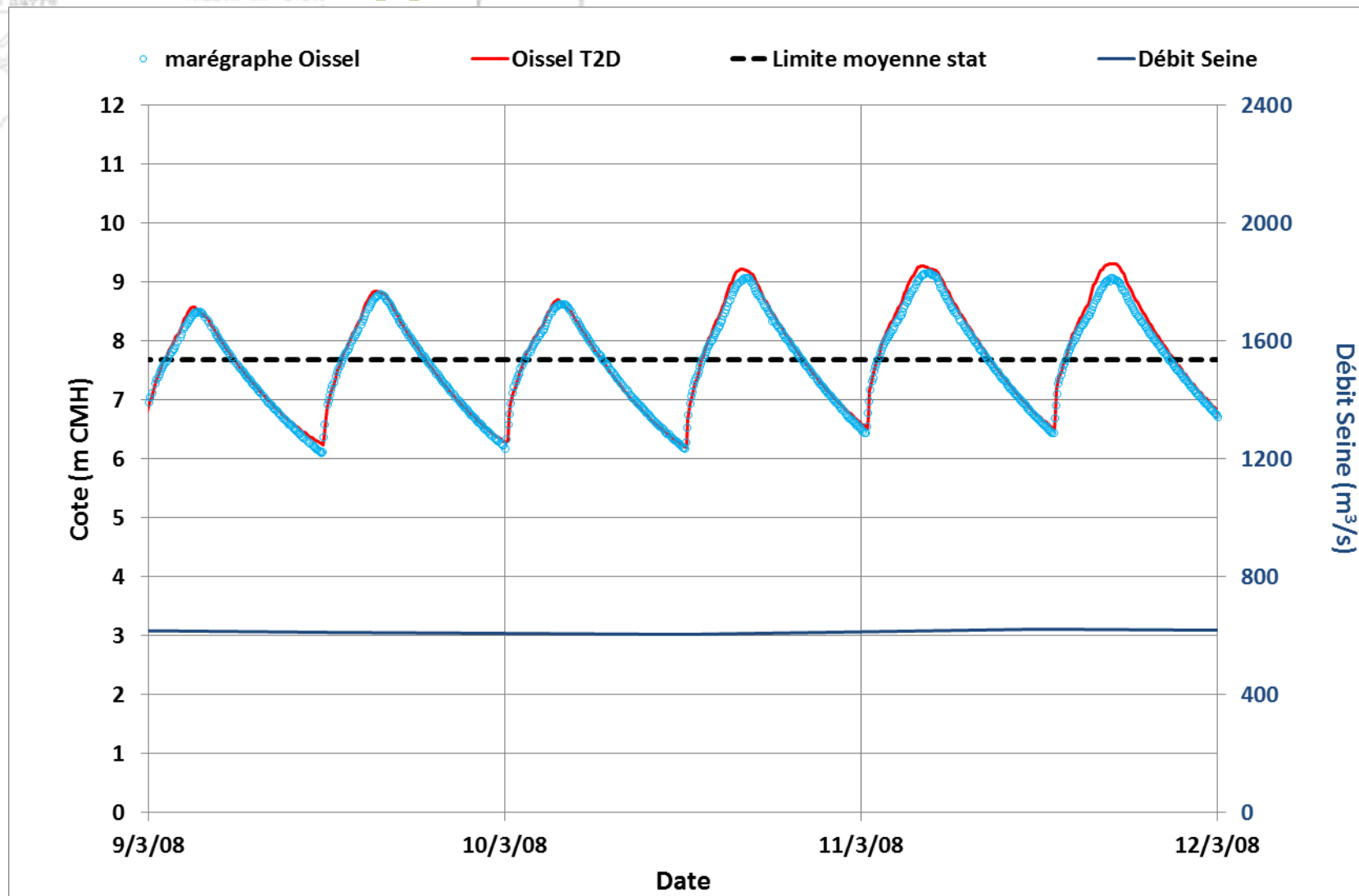
Événement de 2008 [1]: Petit Couronne



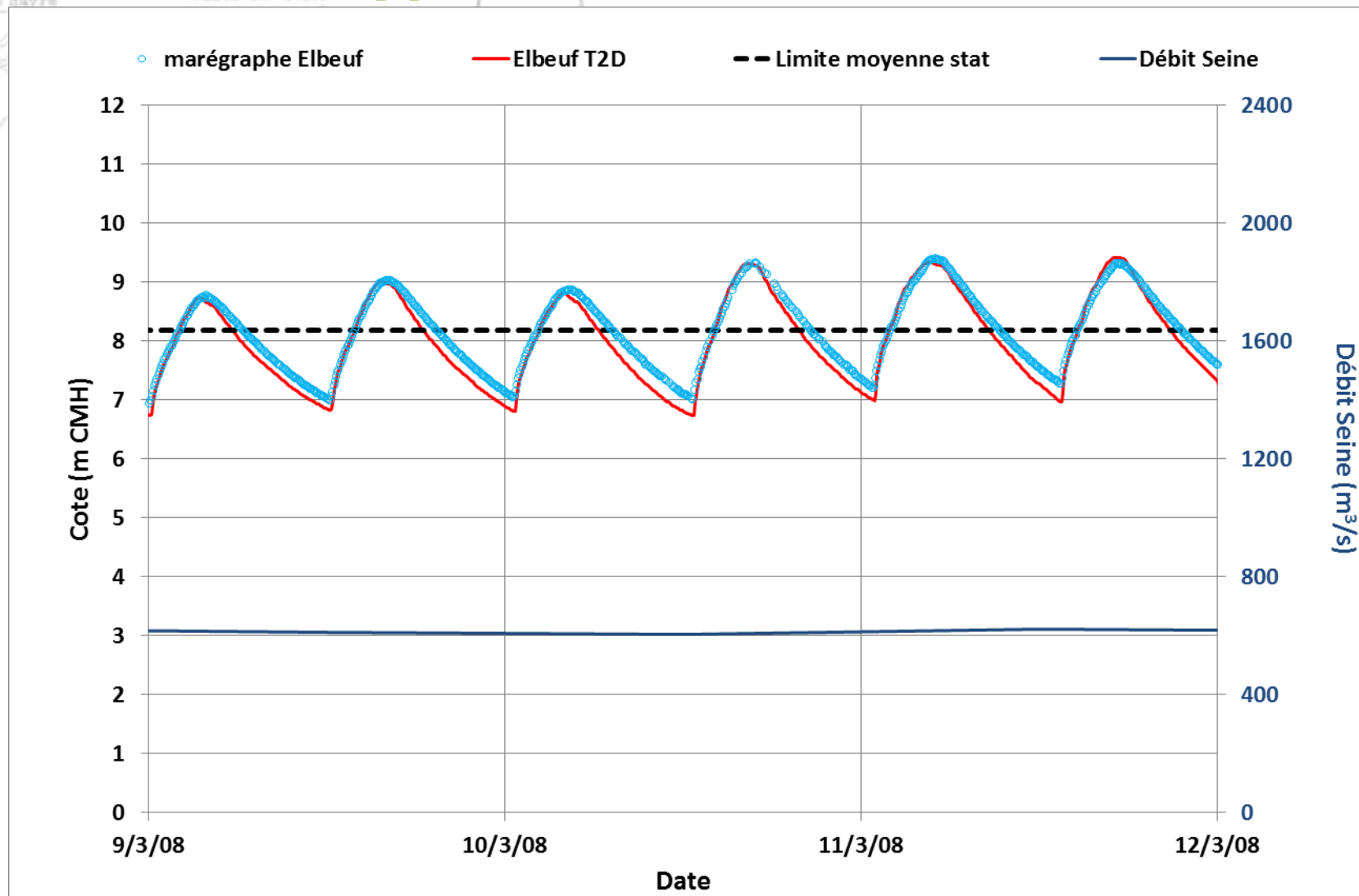
Événement de 2008 [1]: Rouen



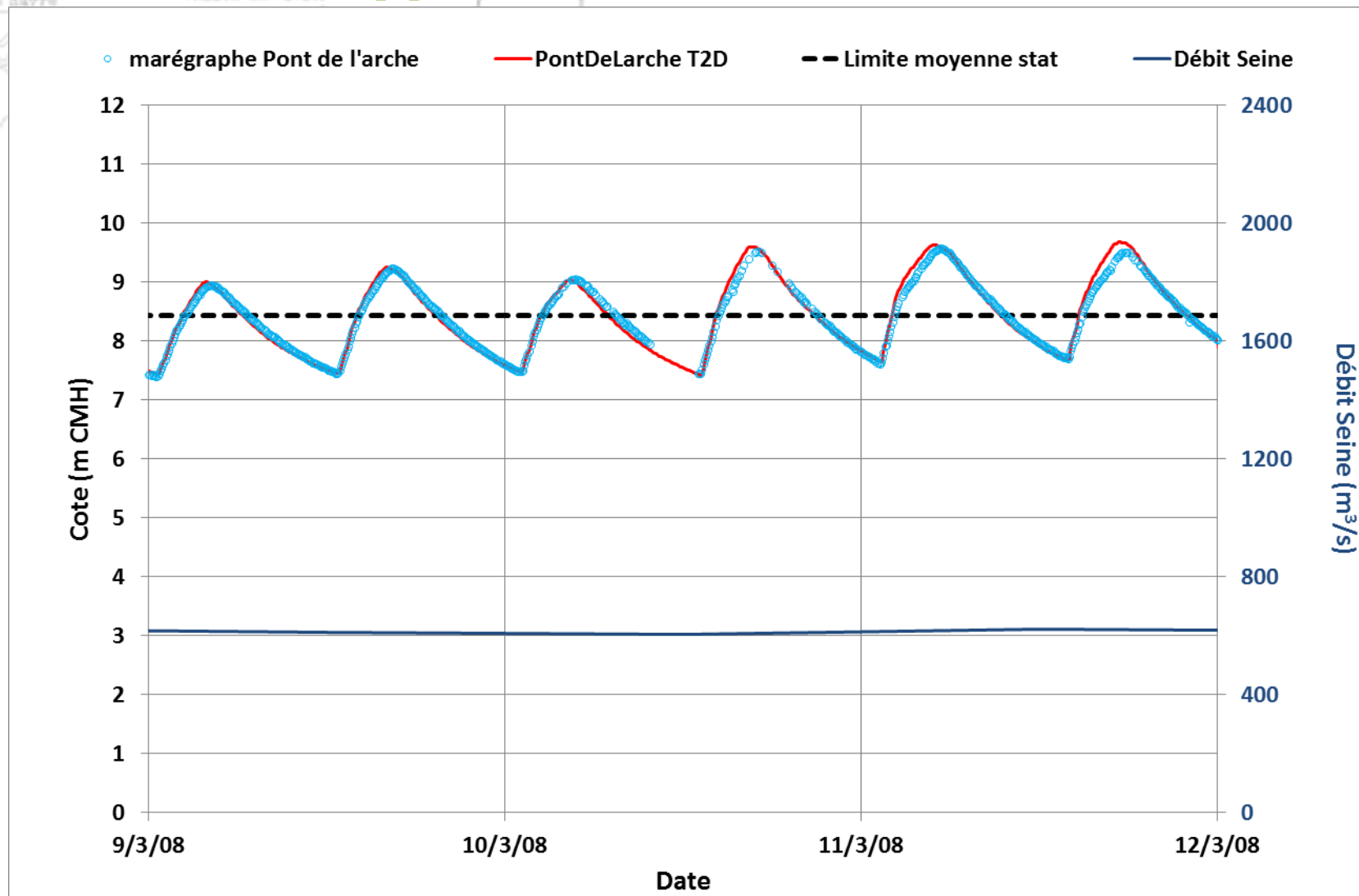
Événement de 2008 [1]: Oissel



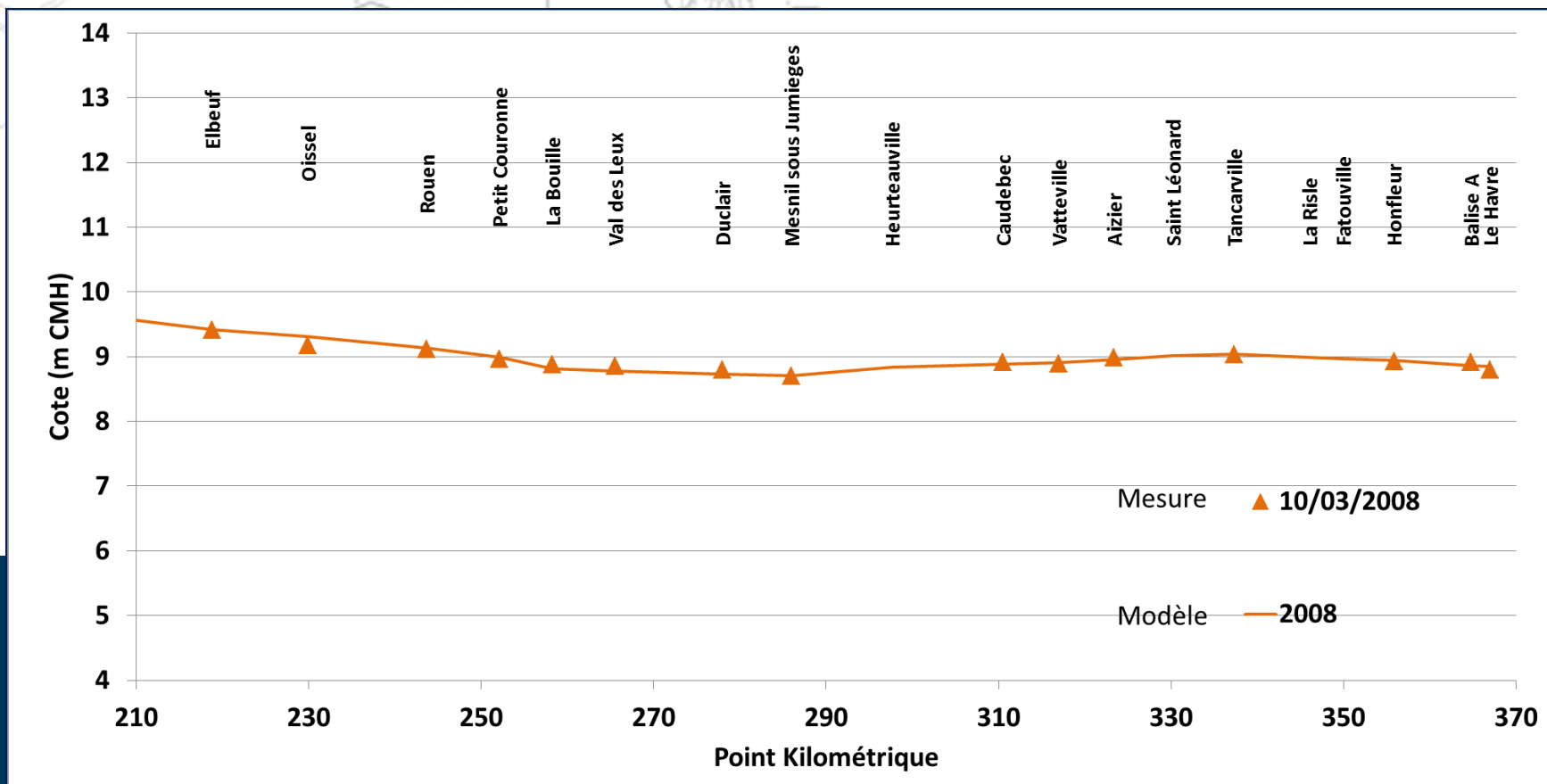
Événement de 2008 [1]: Elbeuf



Événement de 2008 [1]: Pont-de-l'Arche



Événement de 2008 [1]

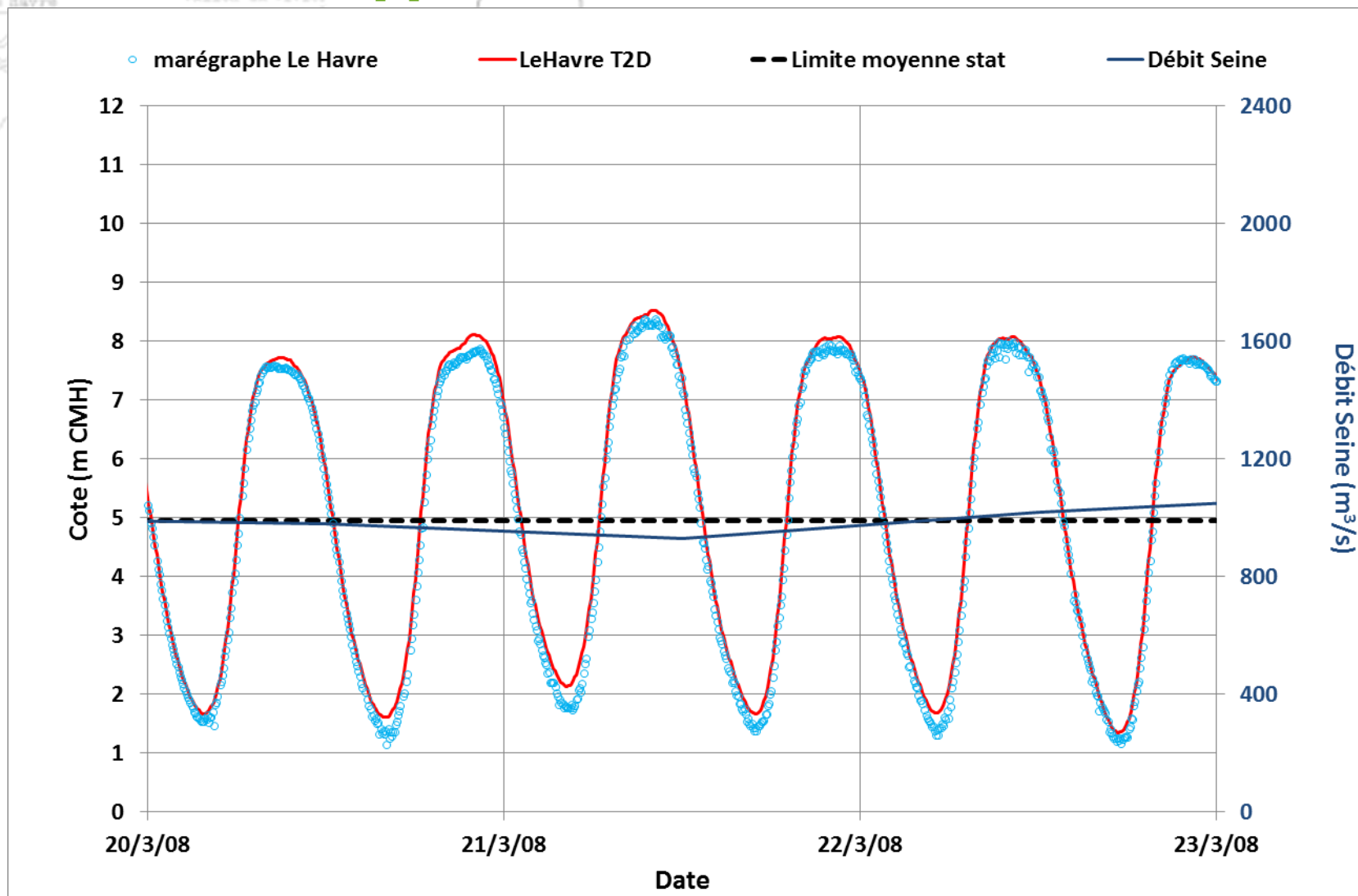




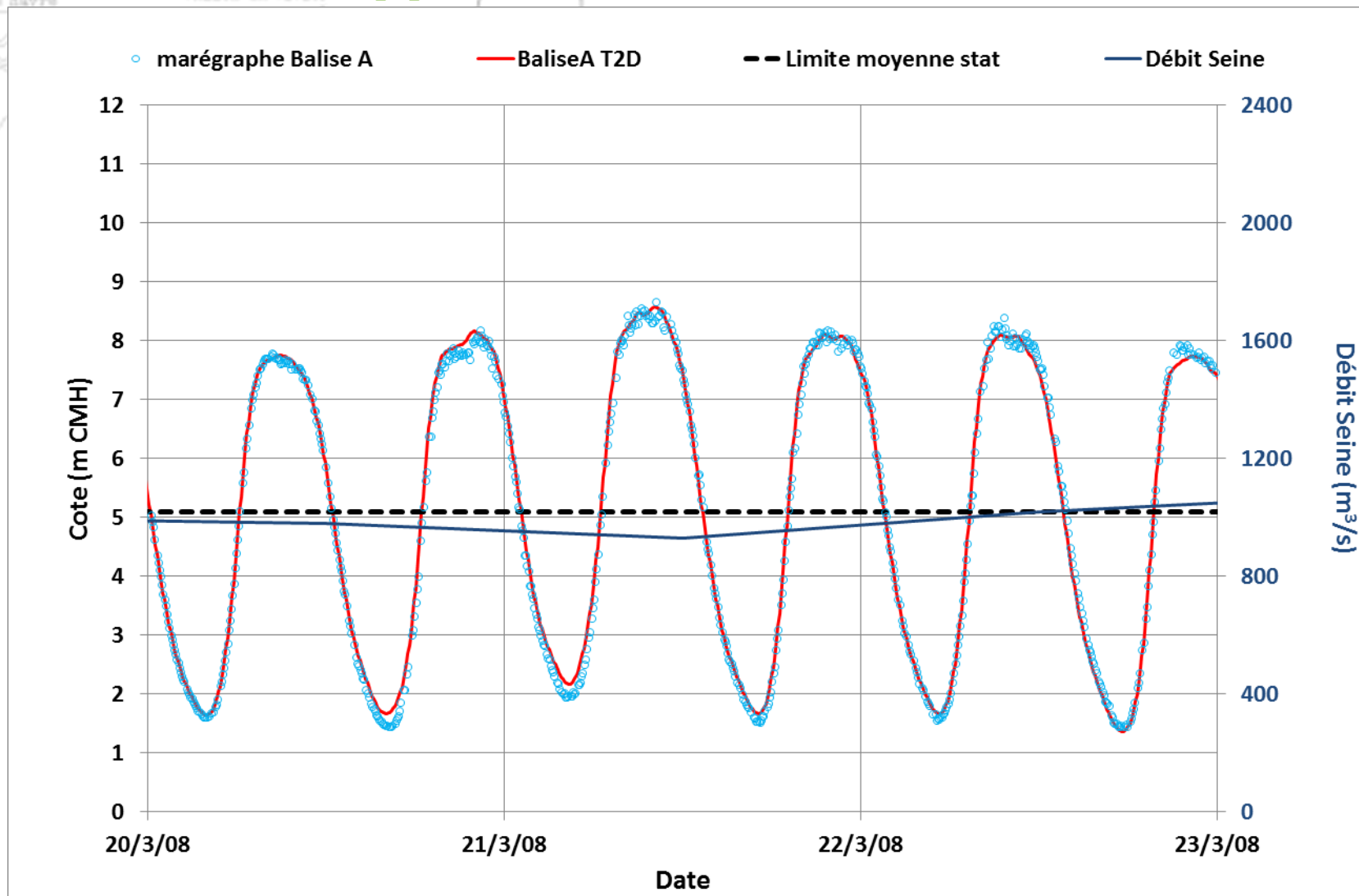
Simulation de tempête 2008

Période du 21 mars

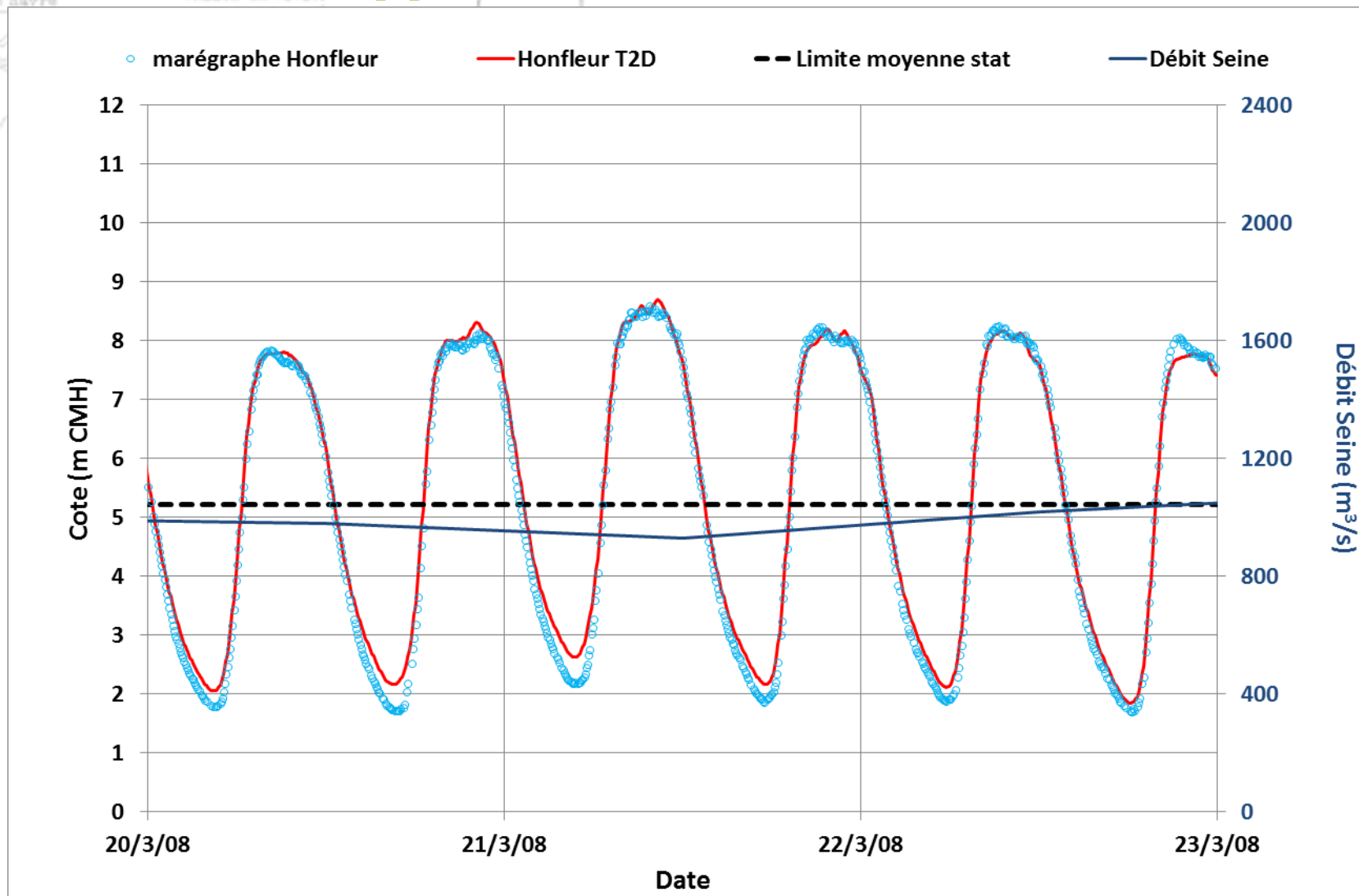
Événement de 2008 [2]: Le Havre



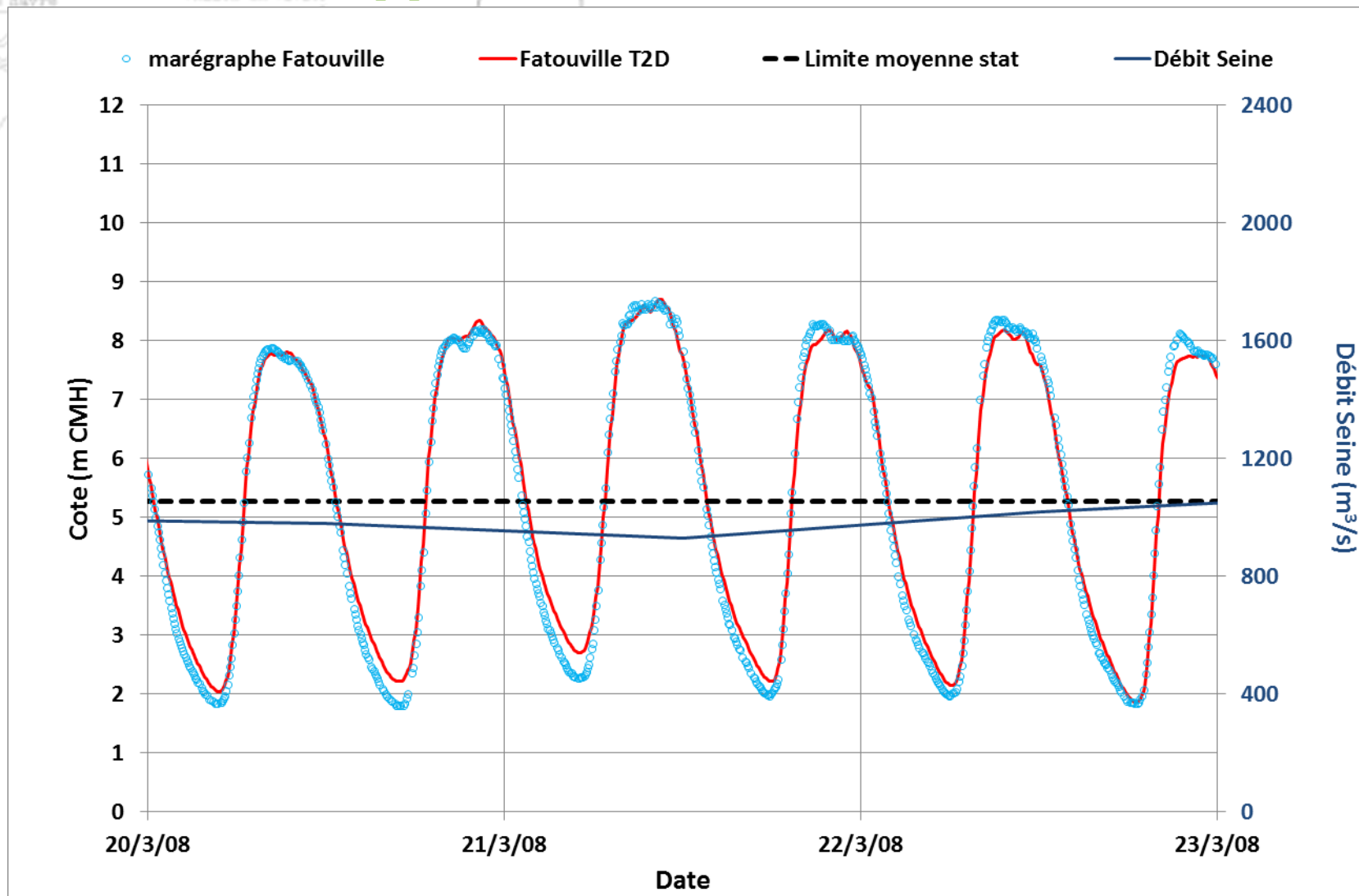
Événement de 2008 [2]: Balise A



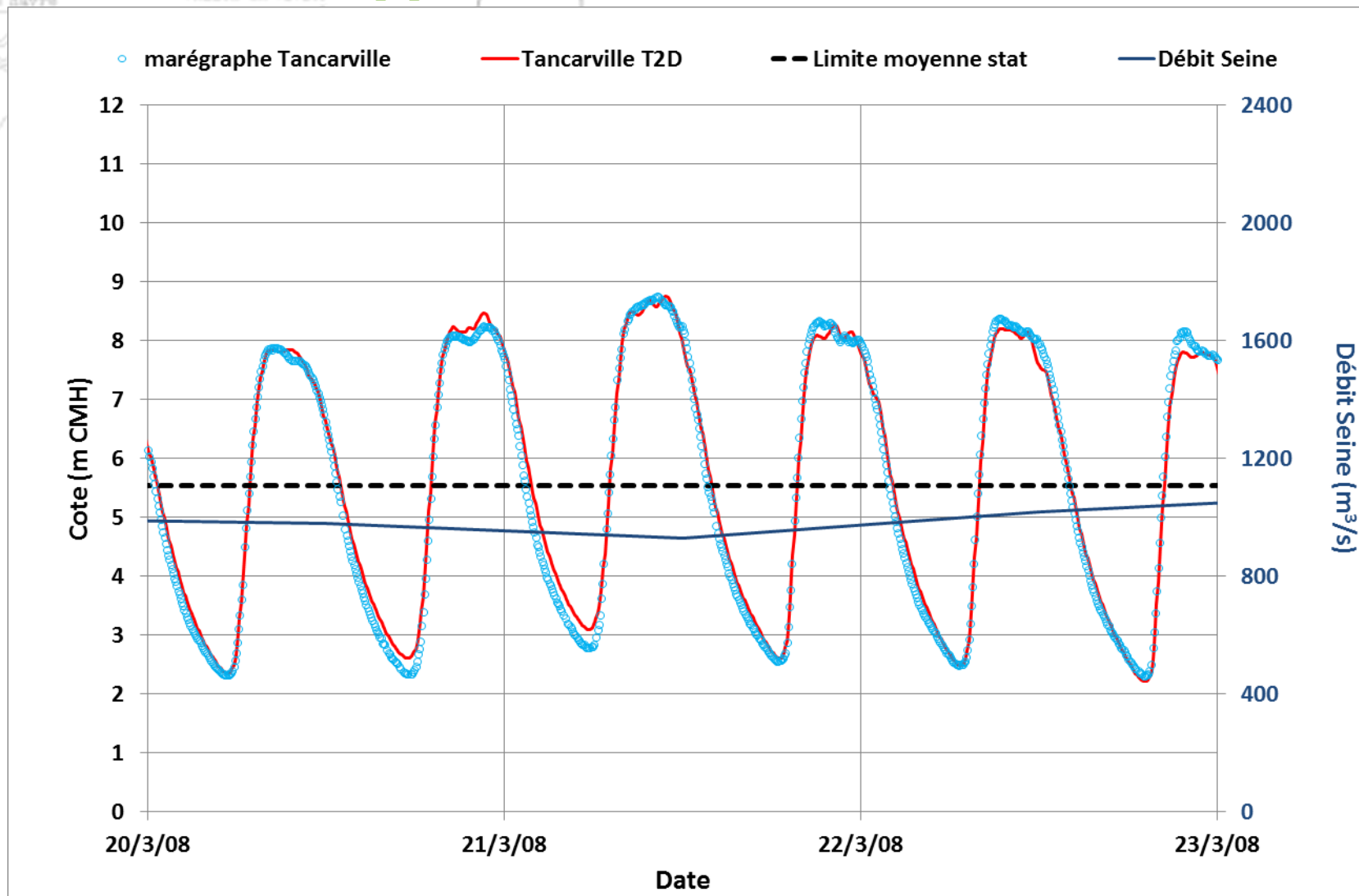
Événement de 2008 [2]: Honfleur



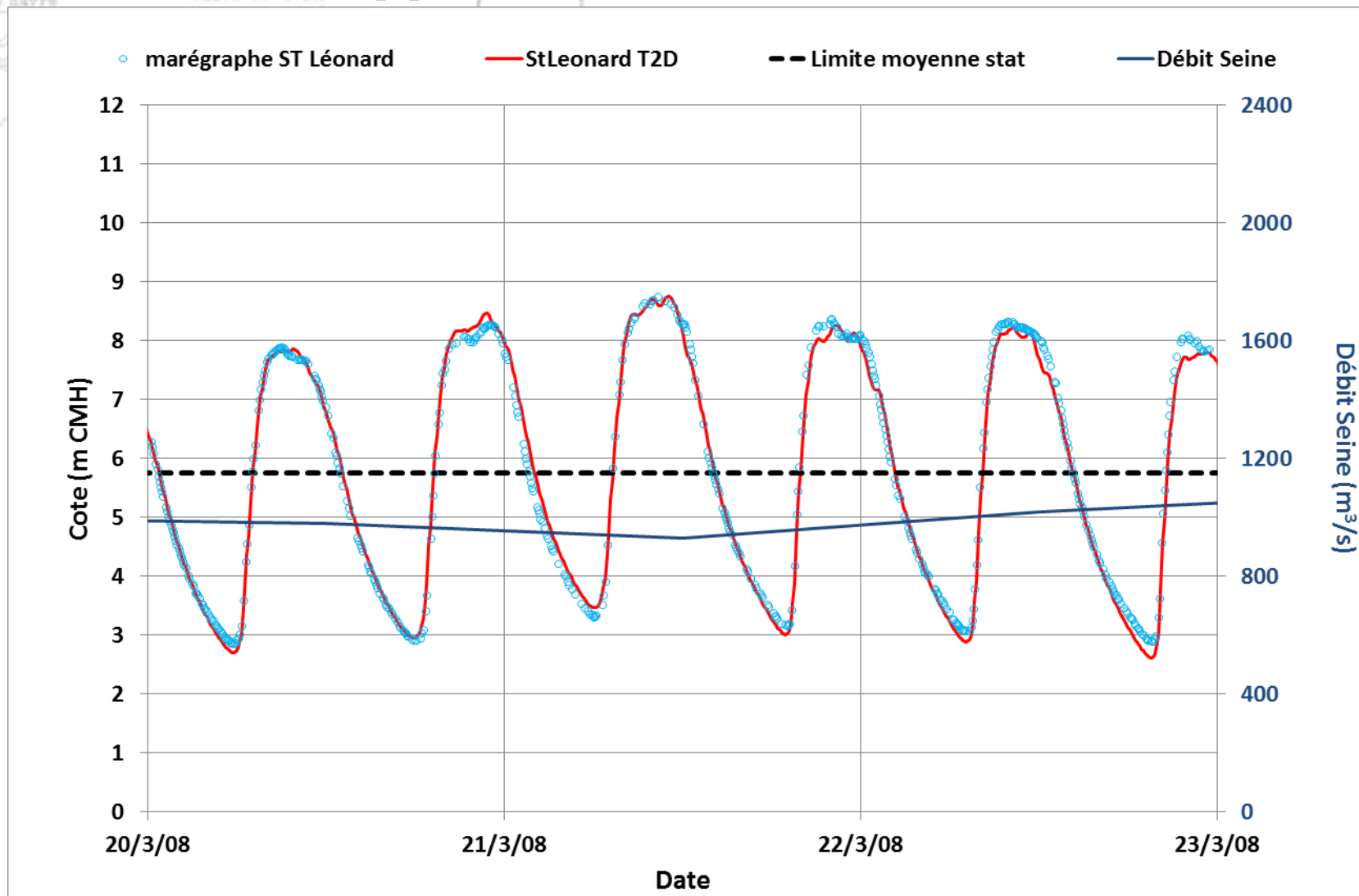
Événement de 2008 [2]: Fatouville



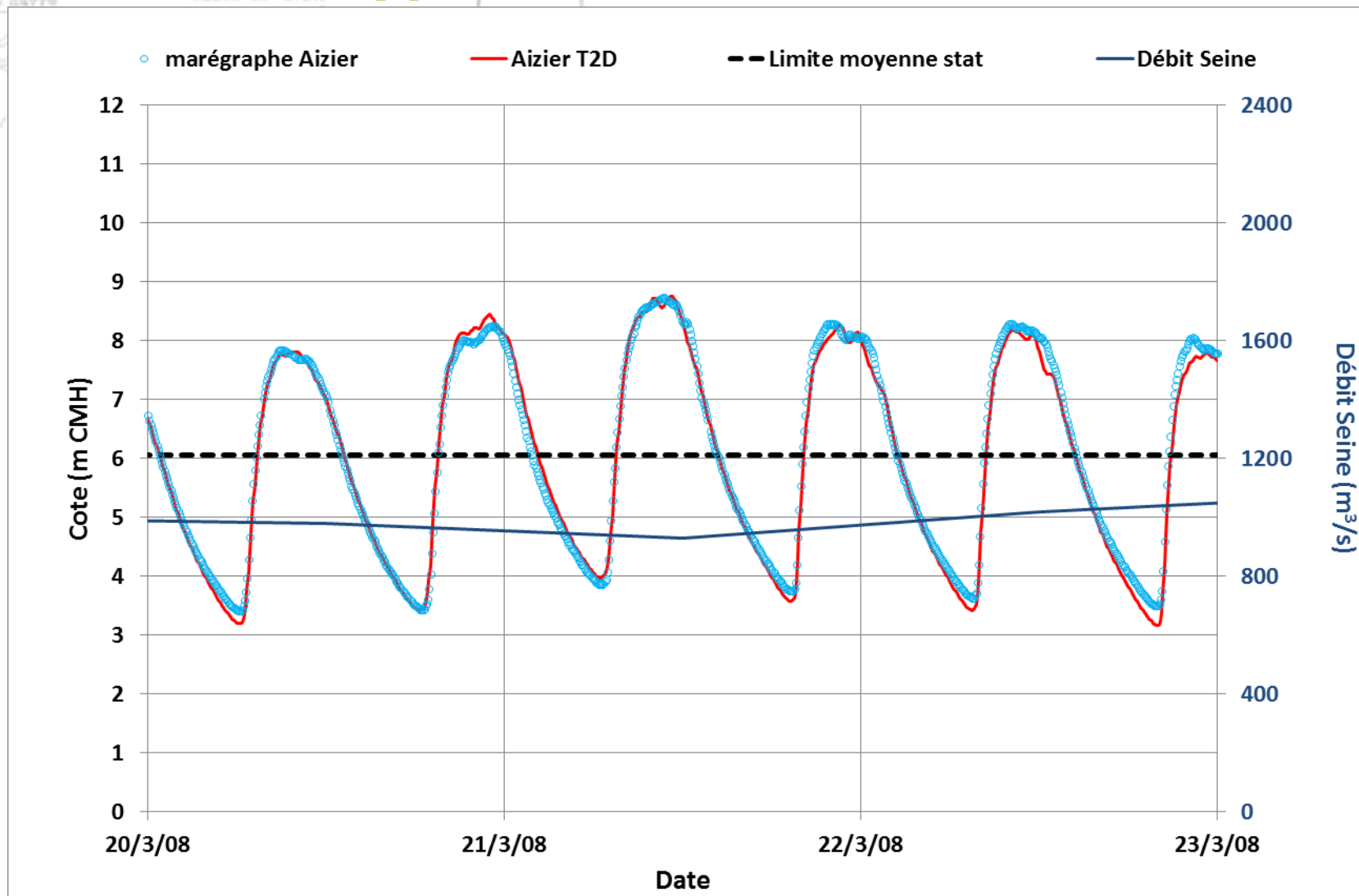
Événement de 2008 [2]: Tancarville



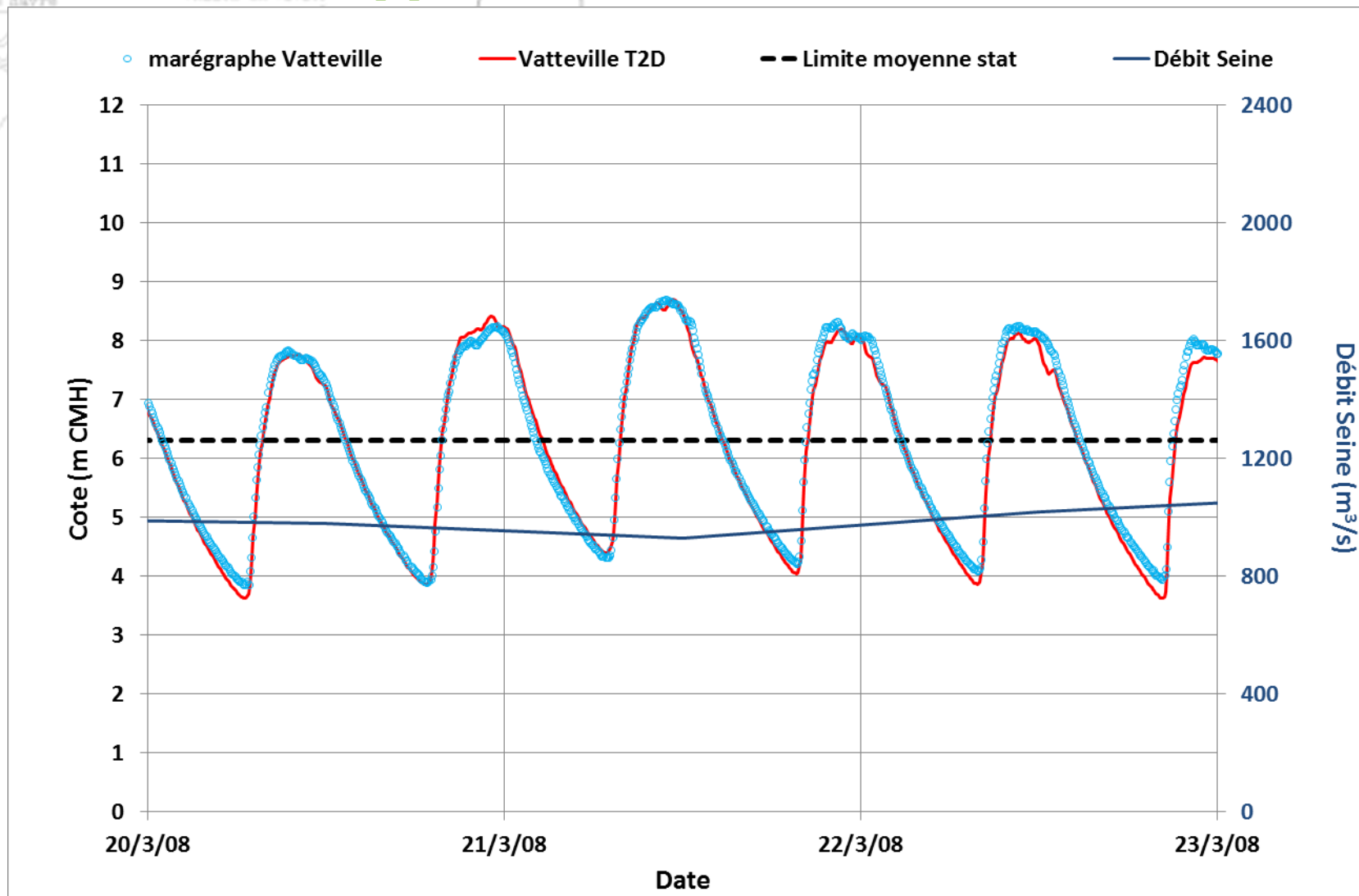
Événement de 2008 [2]: St Léonard



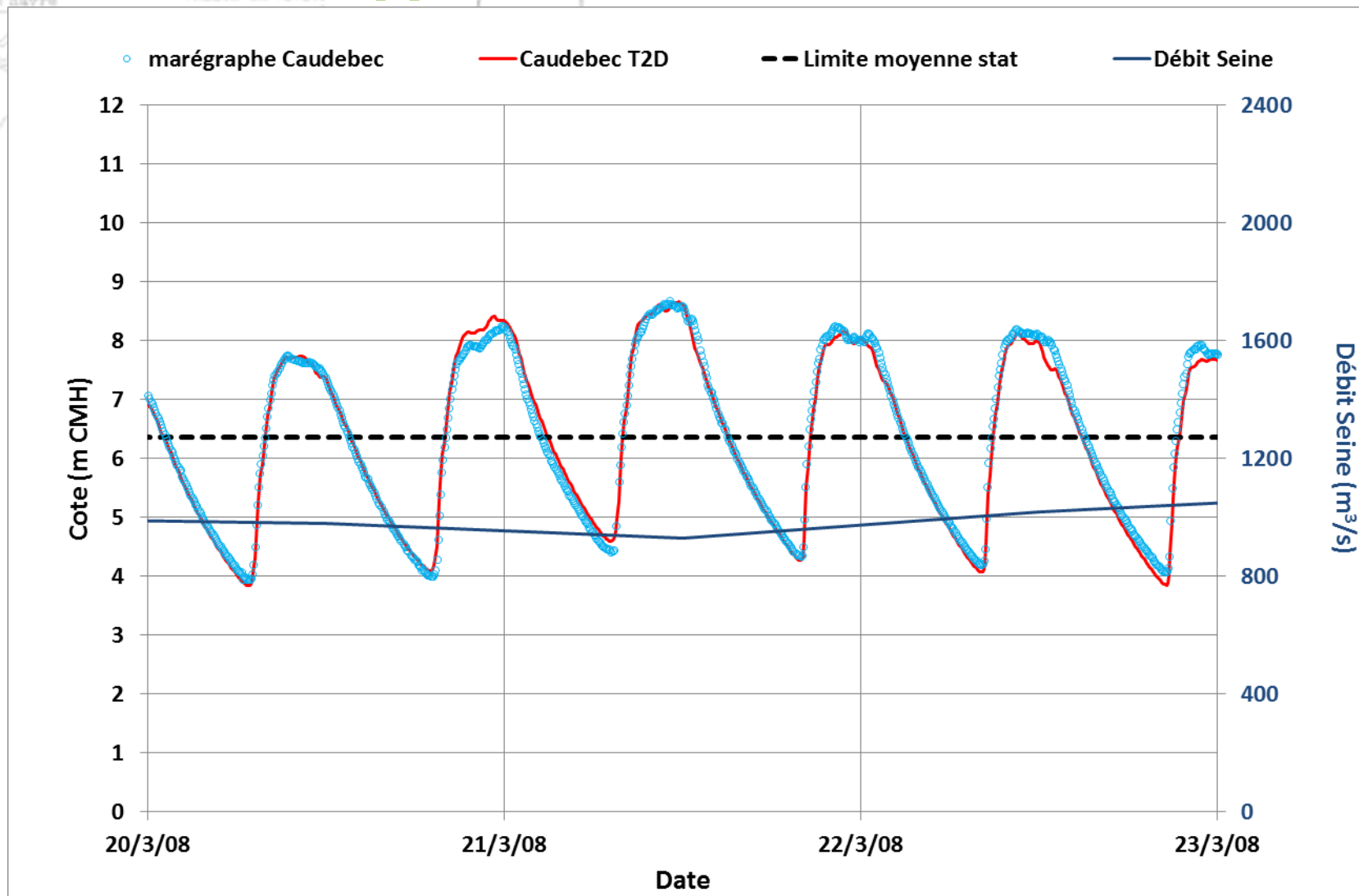
Événement de 2008 [2]: Aizier



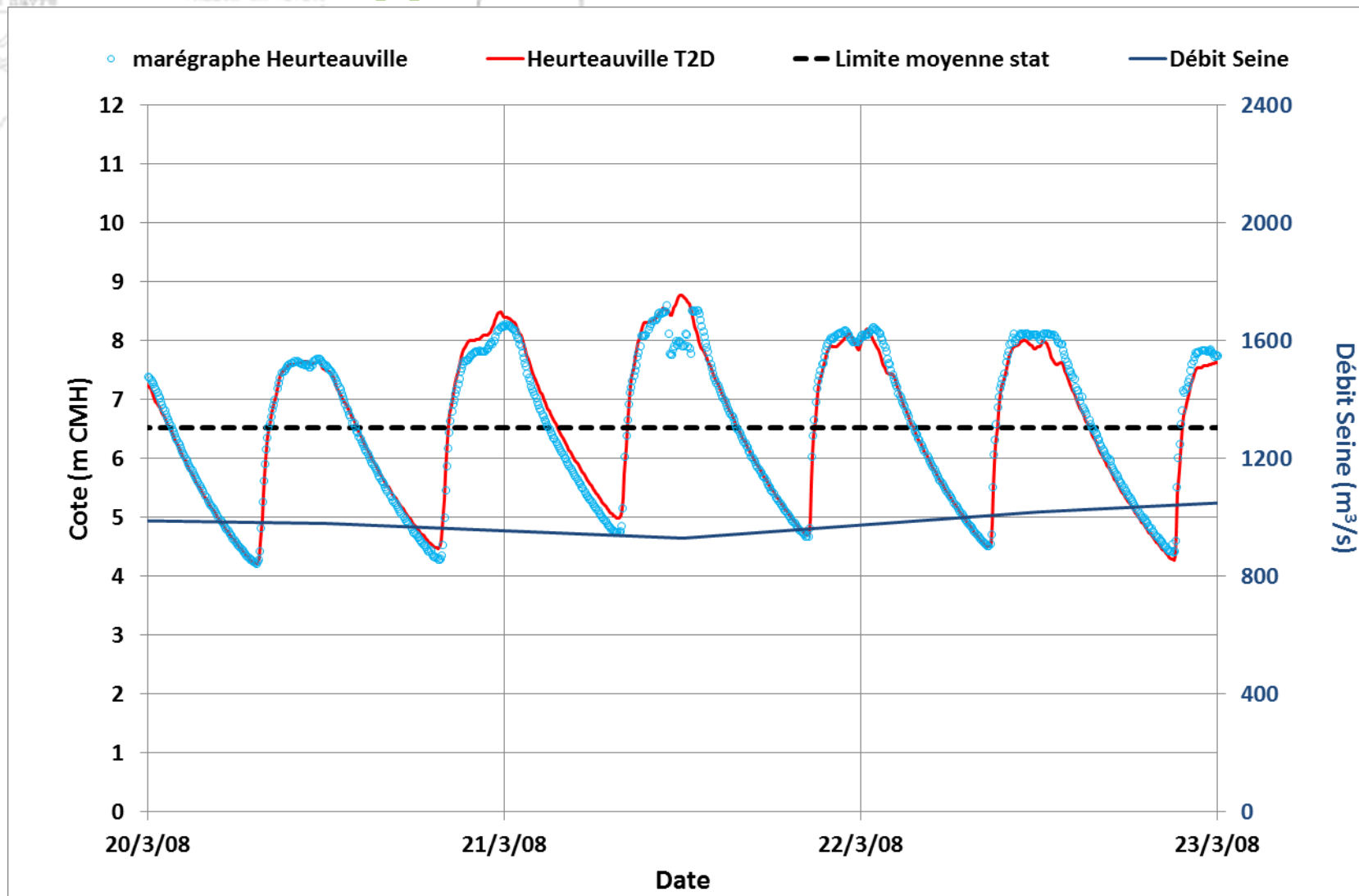
Événement de 2008 [2]: Vatteville



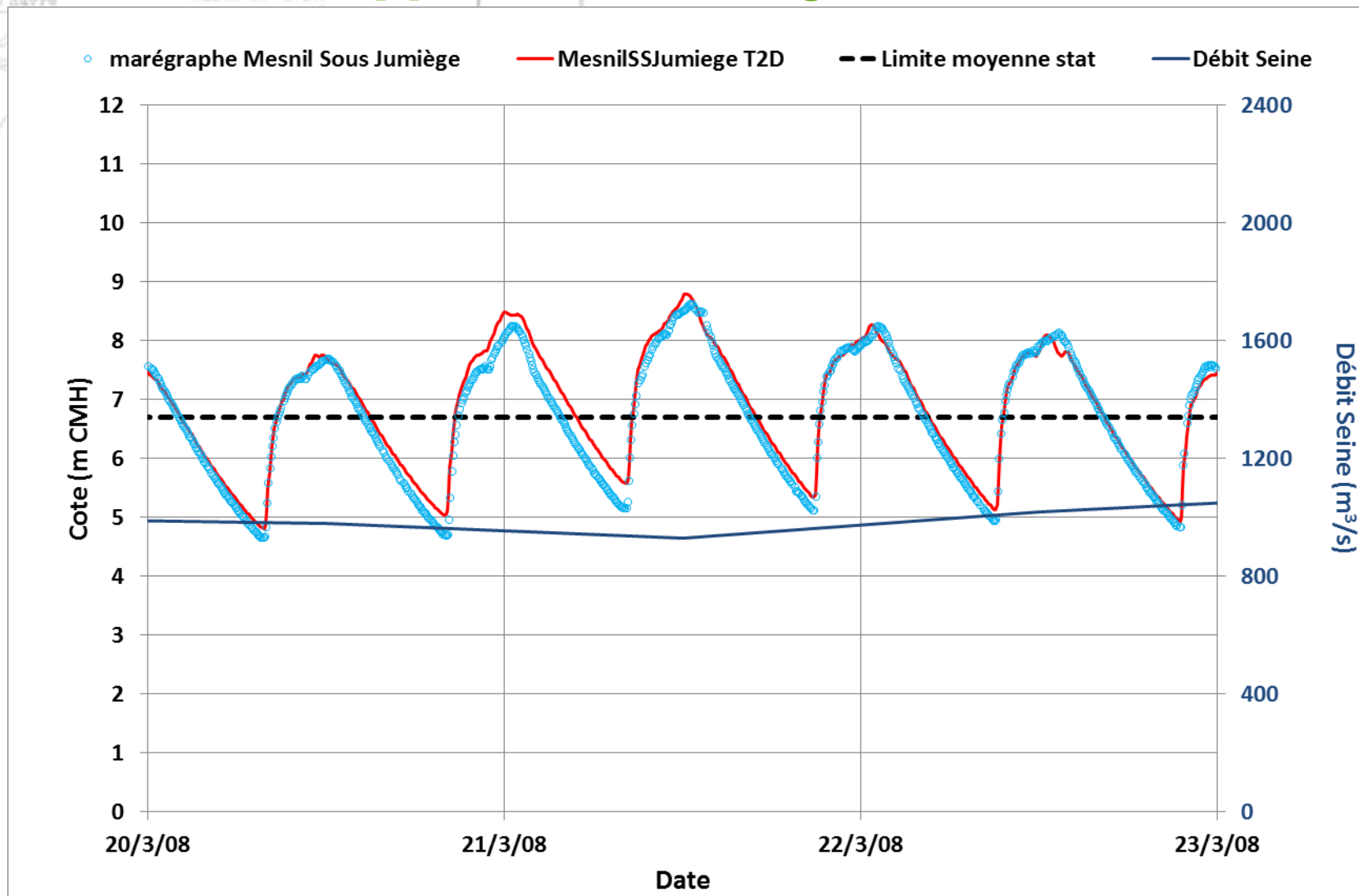
Événement de 2008 [2]: Caudebec



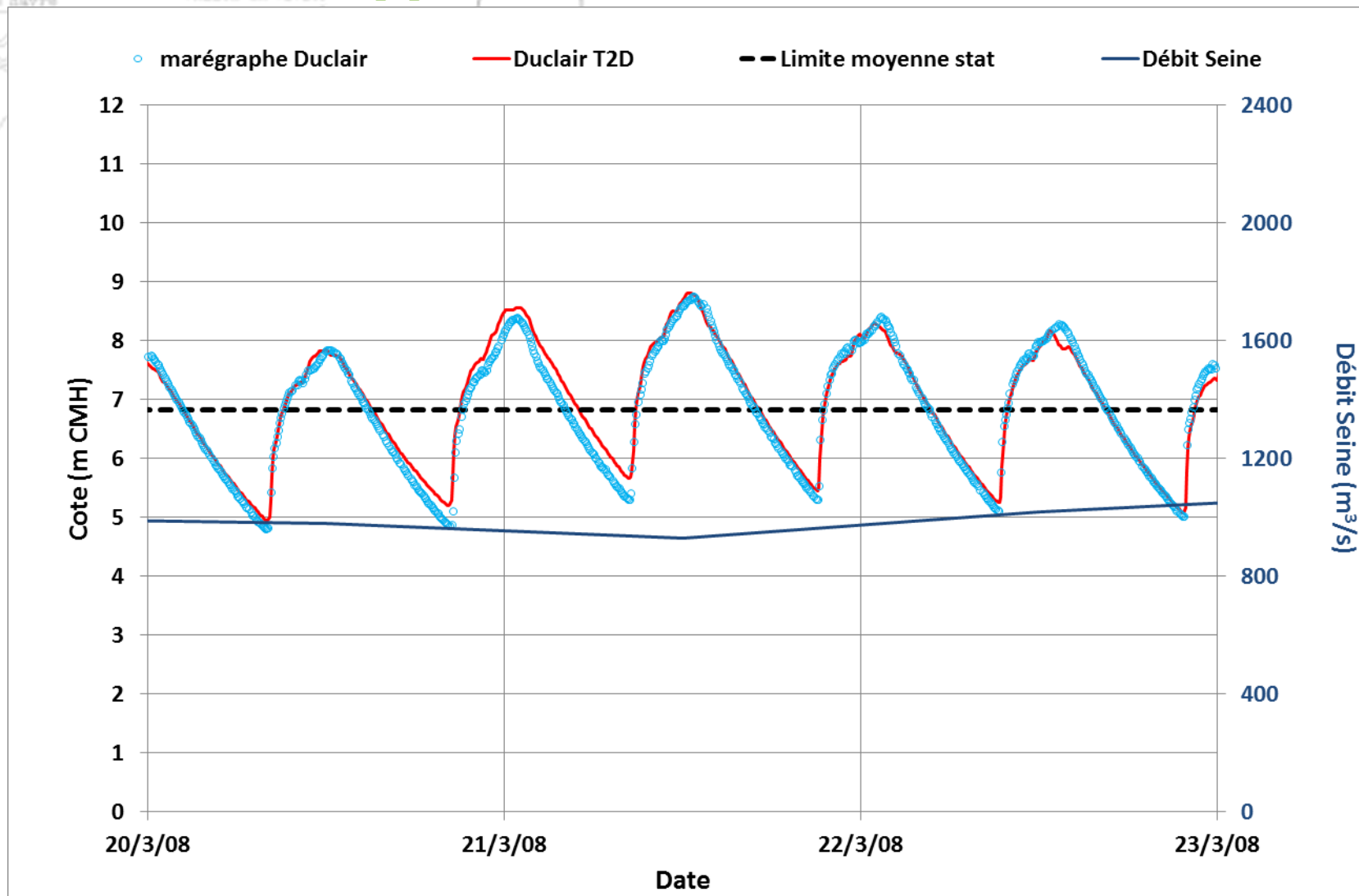
Événement de 2008 [2]: Heurteauville



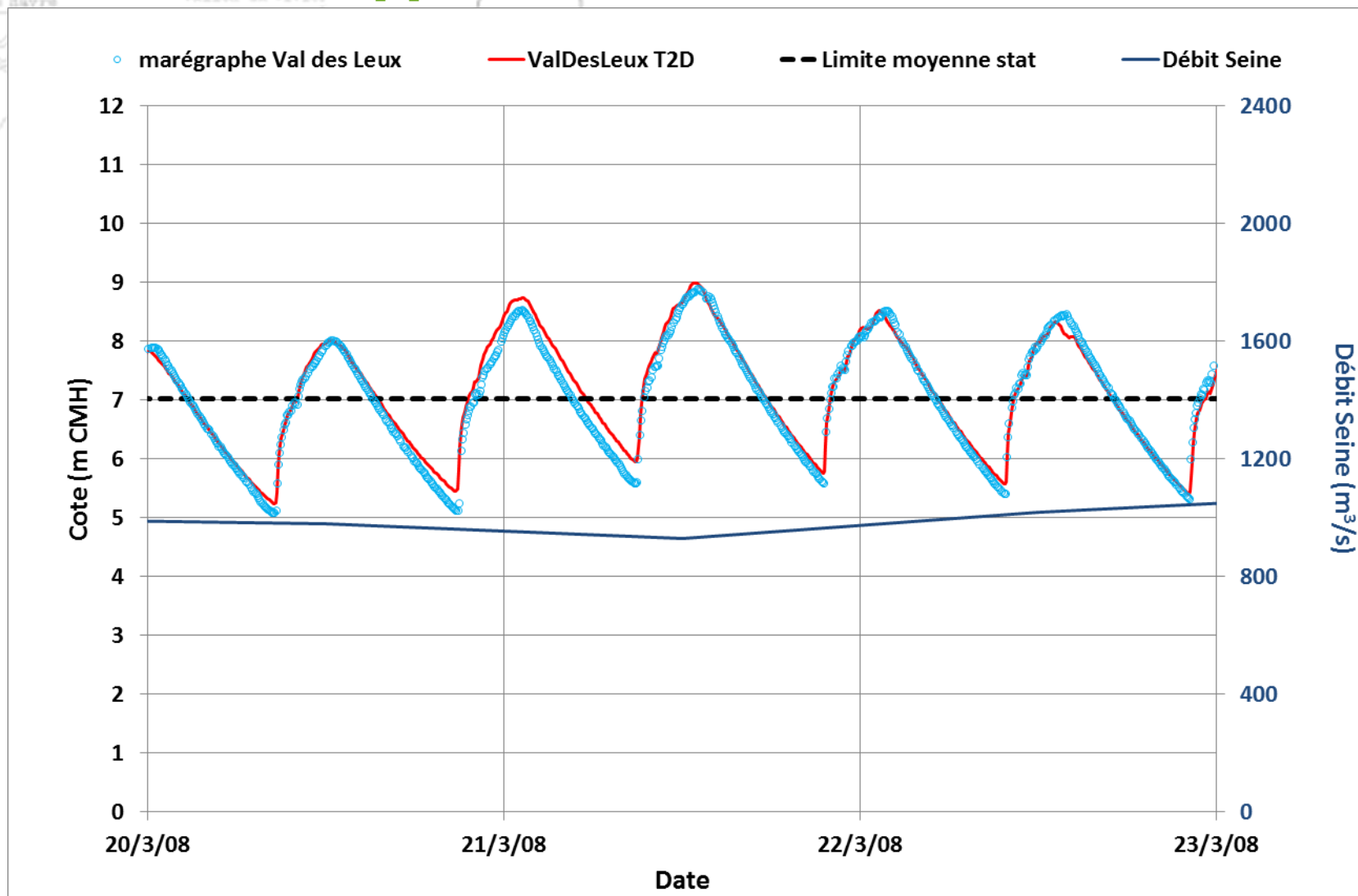
Événement de 2008 [2]: Mesnil-sous-Jumièges



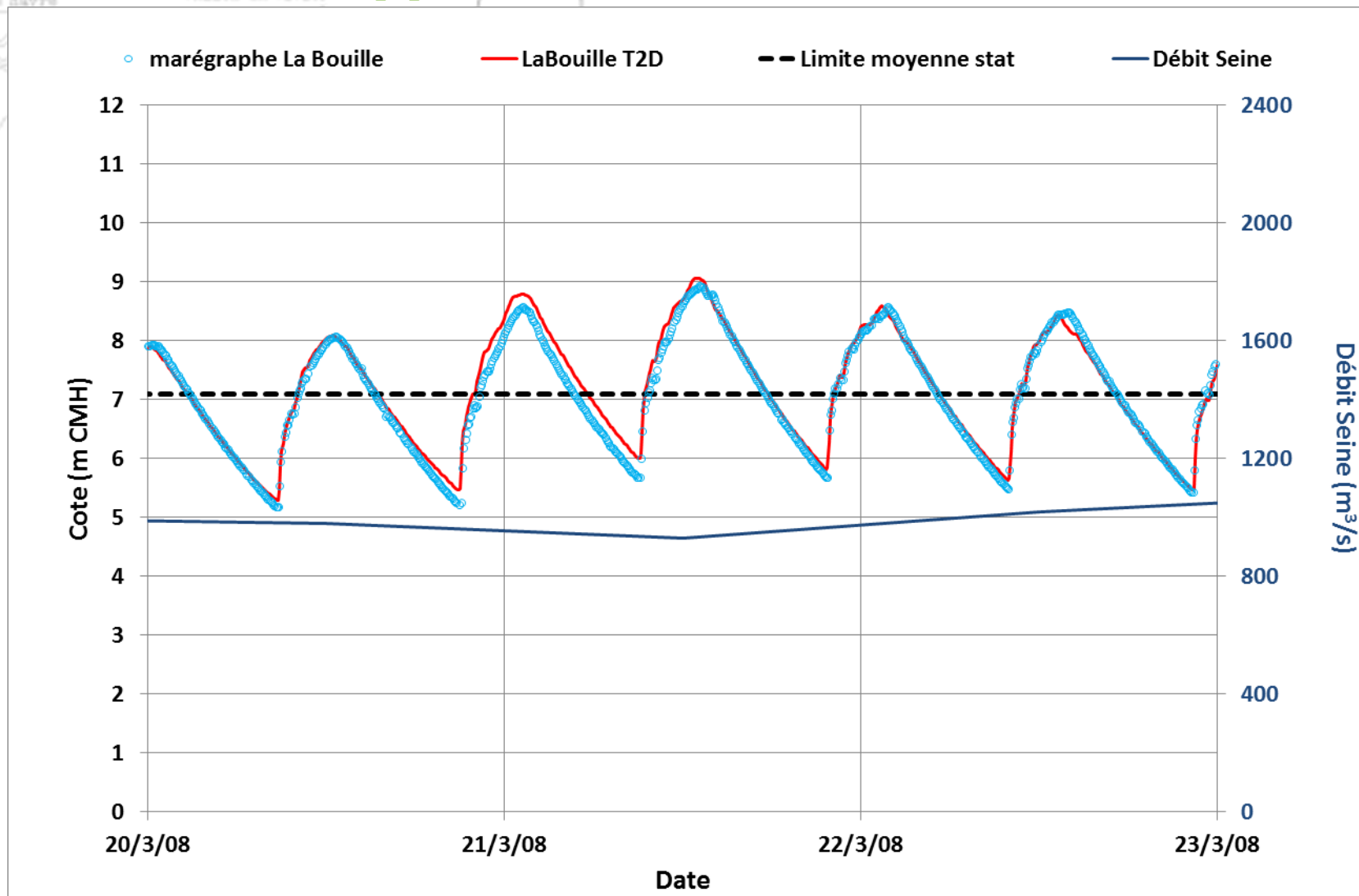
Événement de 2008 [2]: Duclair



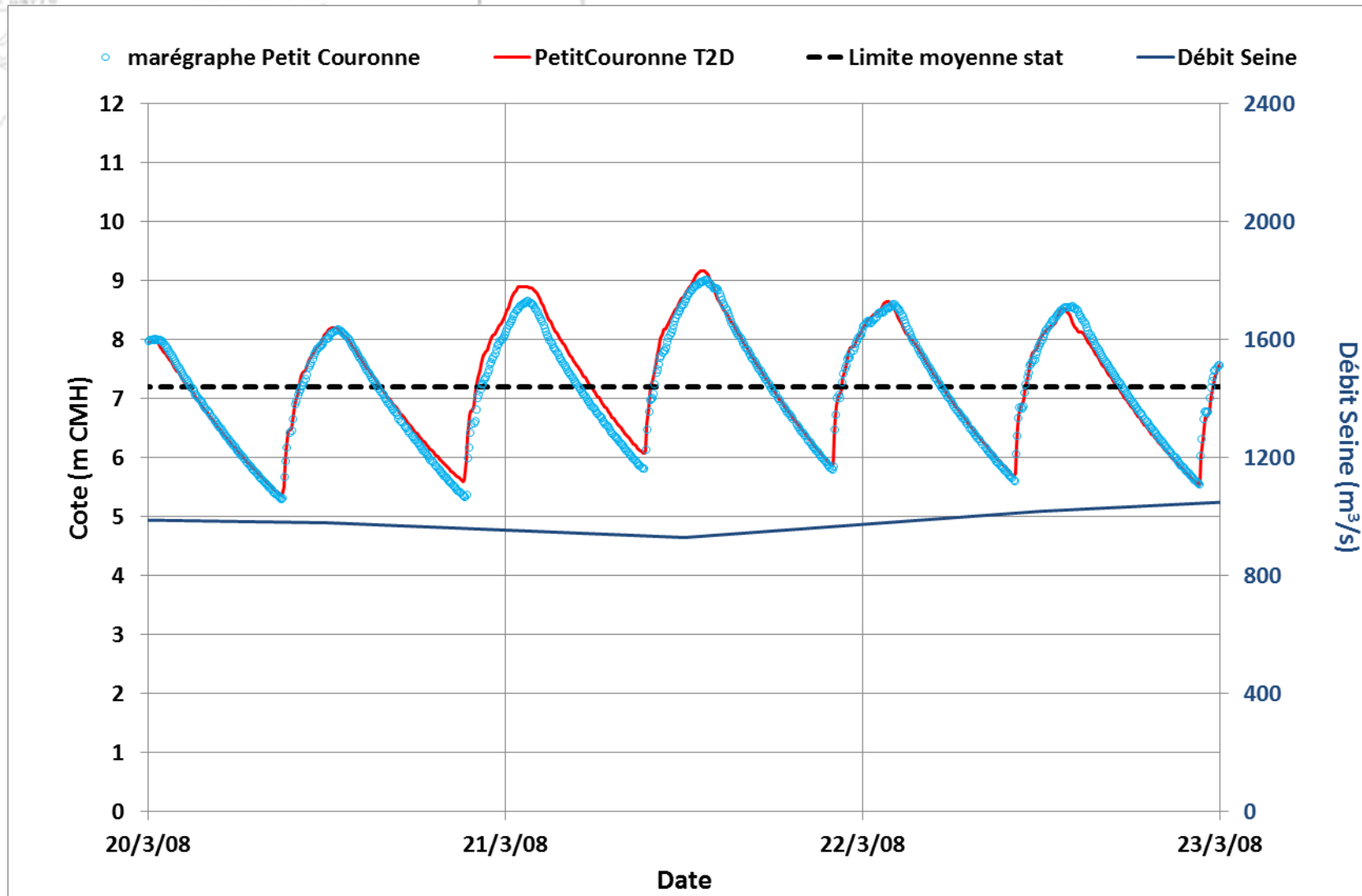
Événement de 2008 [2]: Val-des-Leux



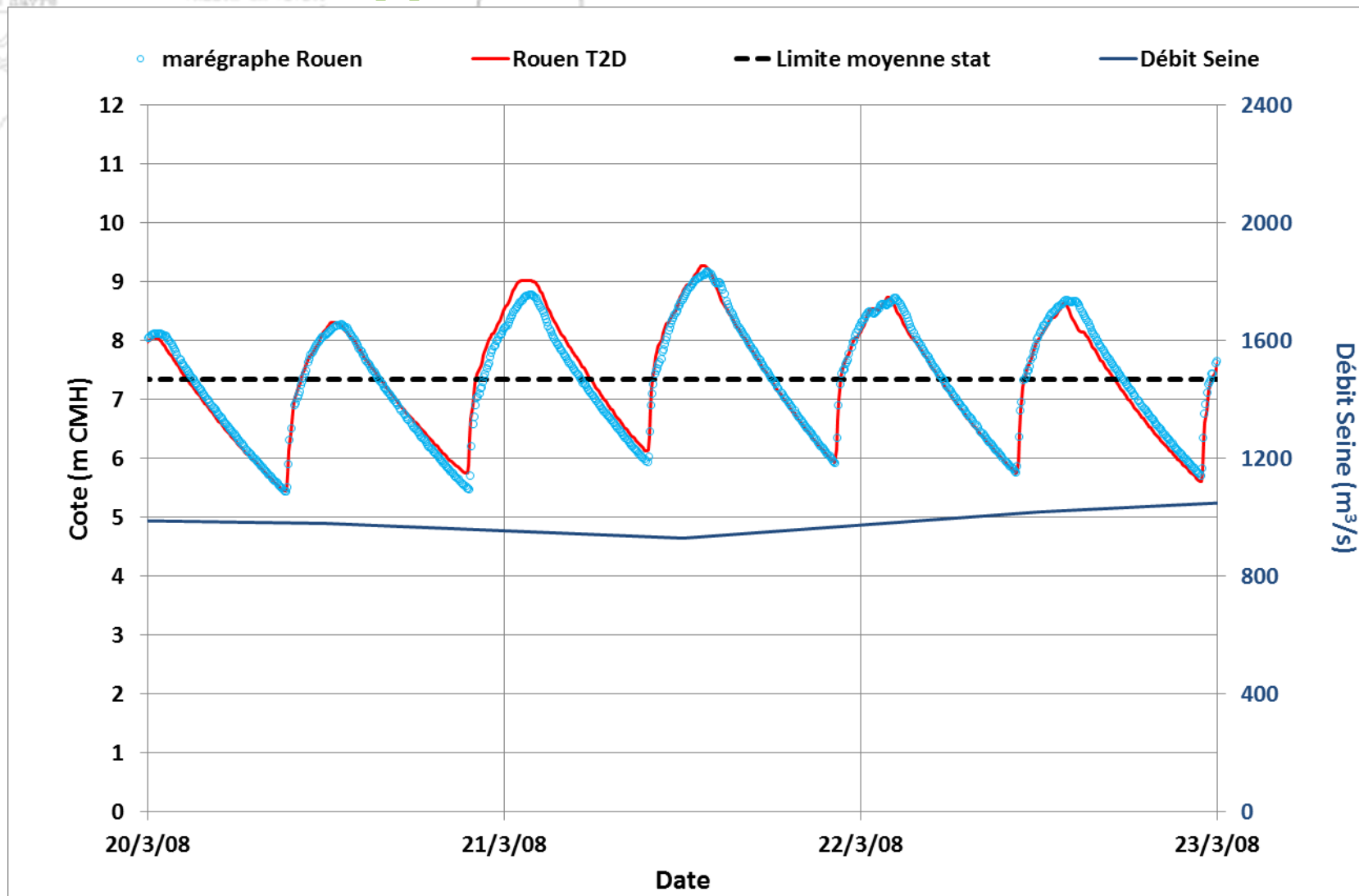
Événement de 2008 [2]: La Bouille



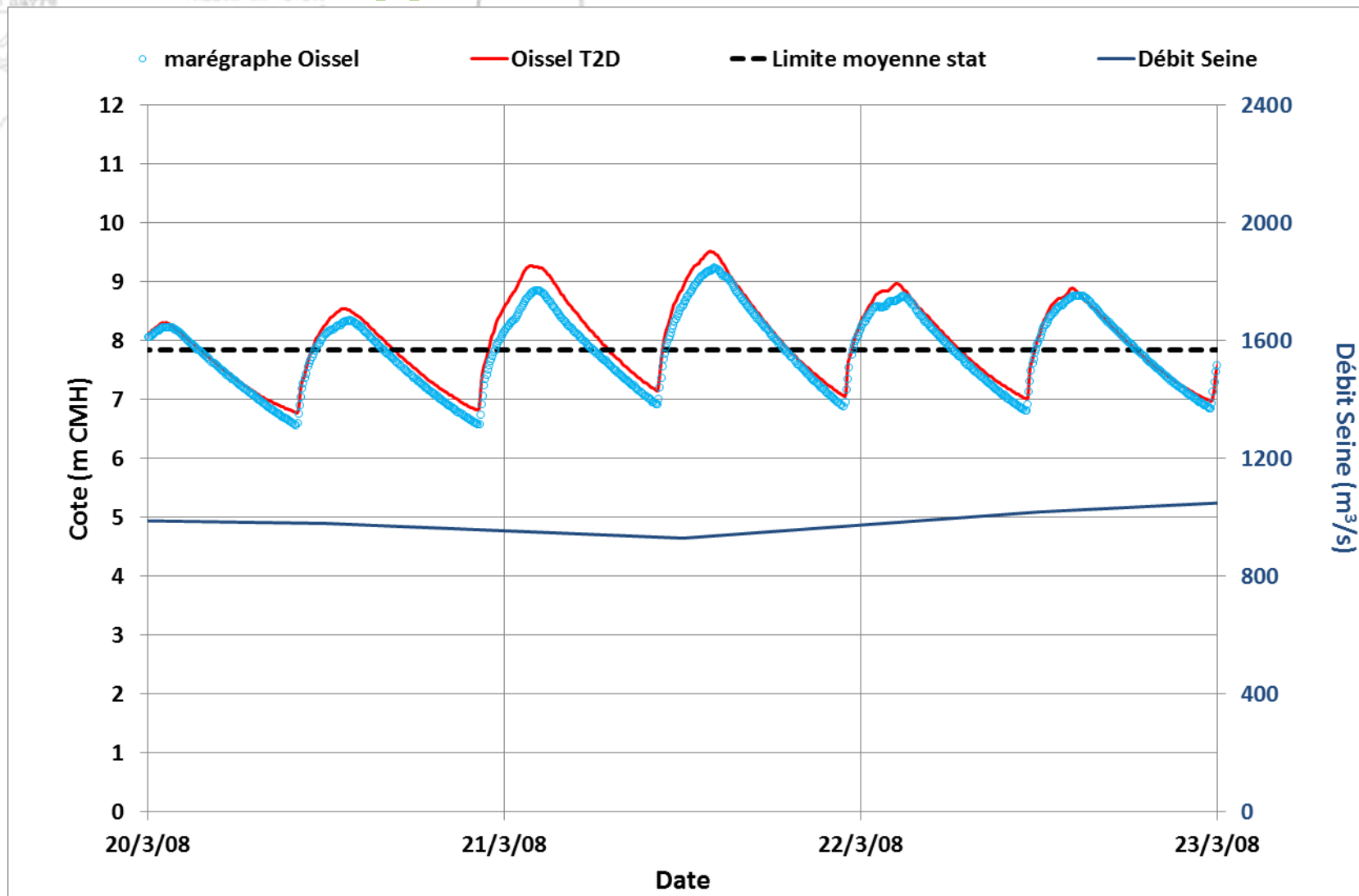
Événement de 2008 [2]: Petit Couronne



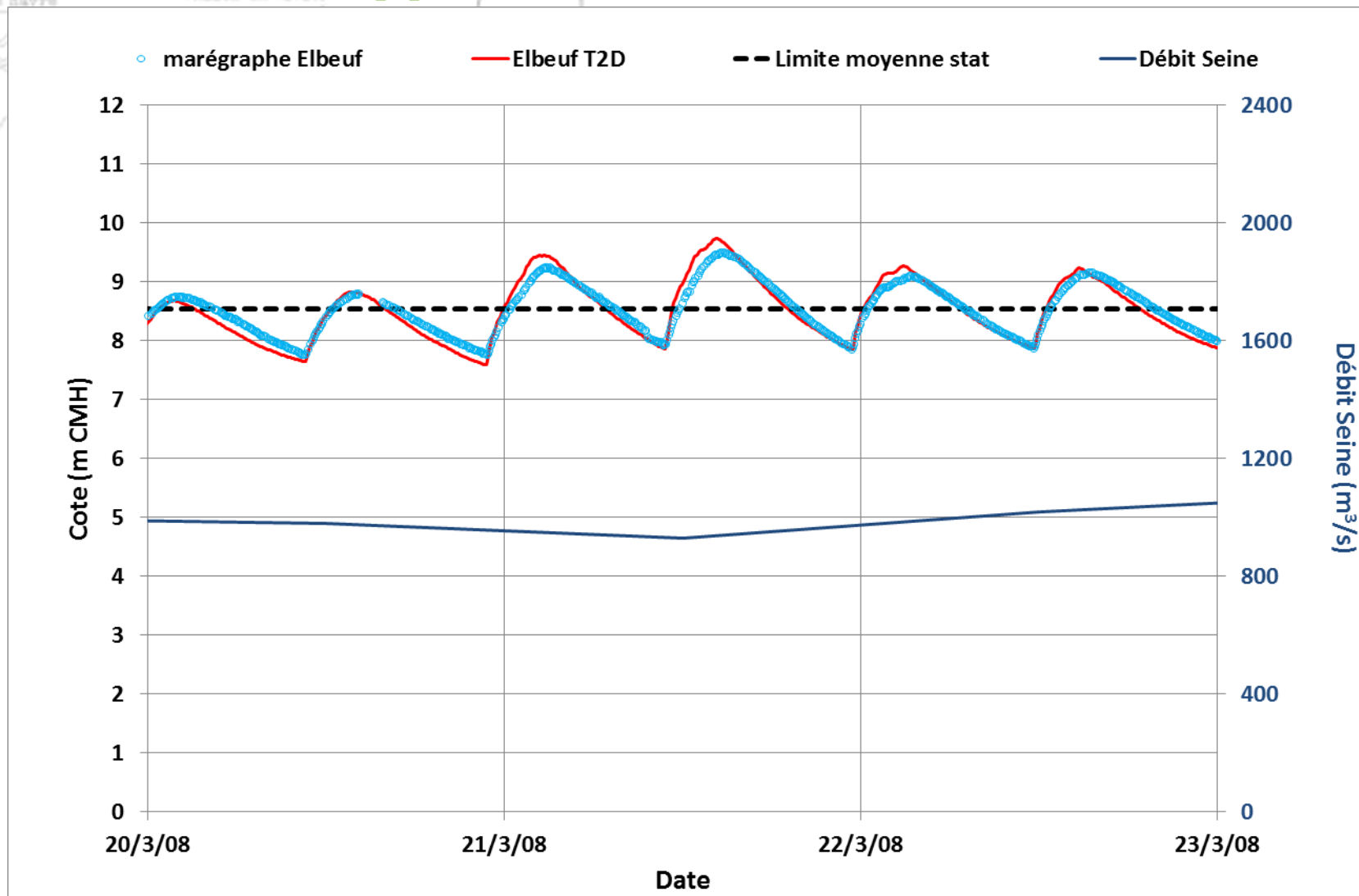
Événement de 2008 [2]: Rouen



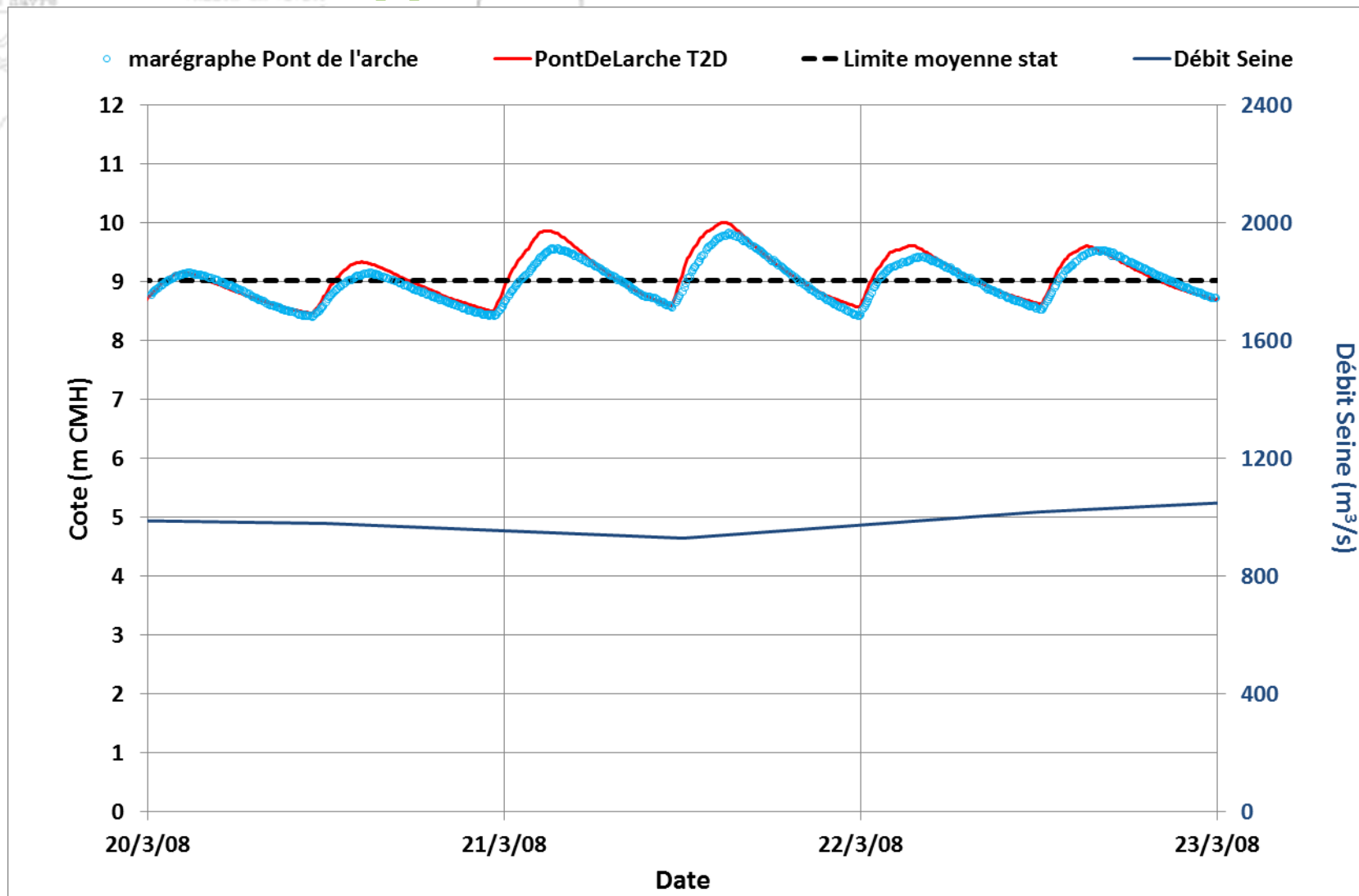
Événement de 2008 [2]: Oissel



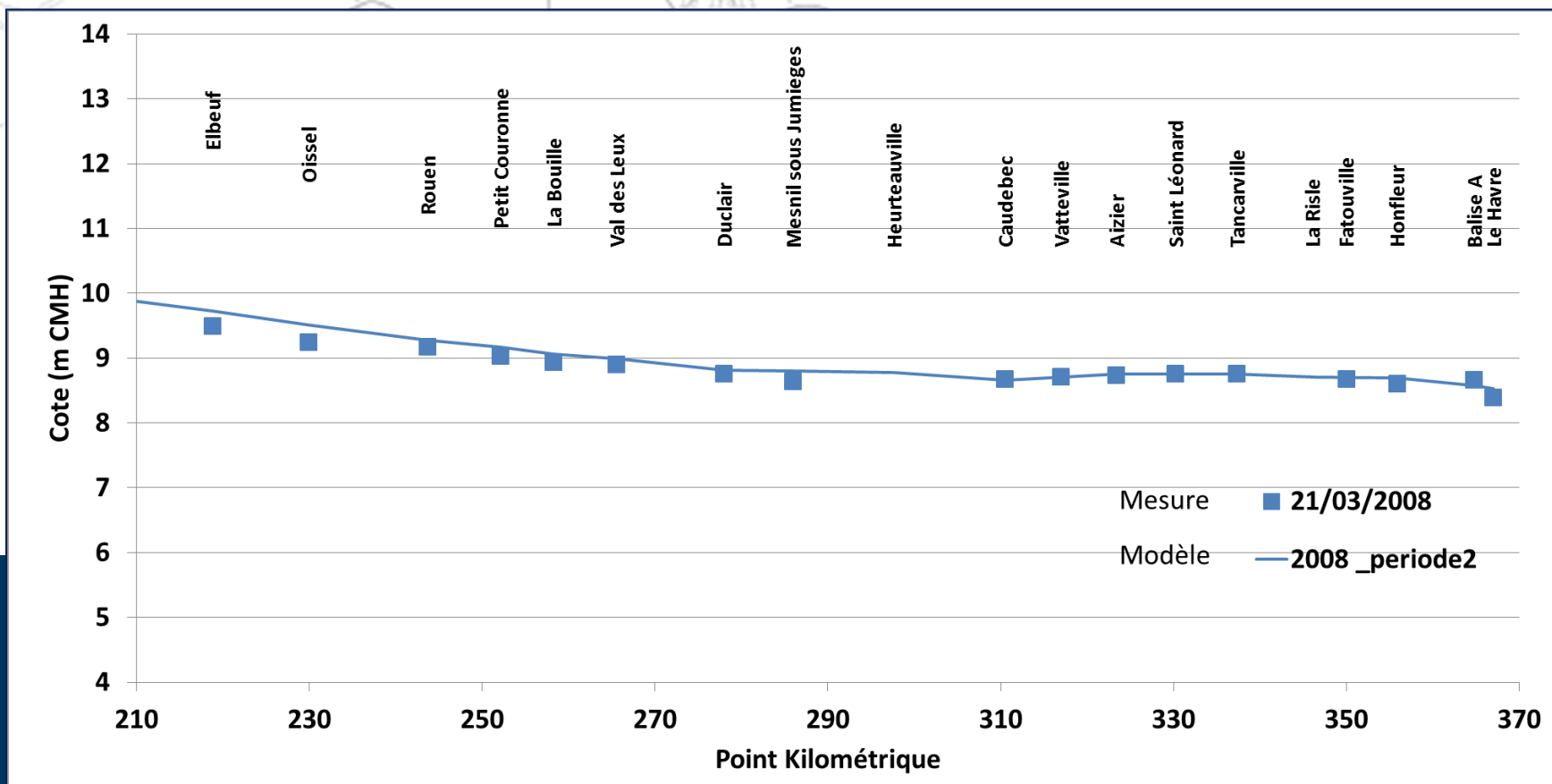
Événement de 2008 [2]: Elbeuf



Événement de 2008 [2]: Pont-de-l'Arche



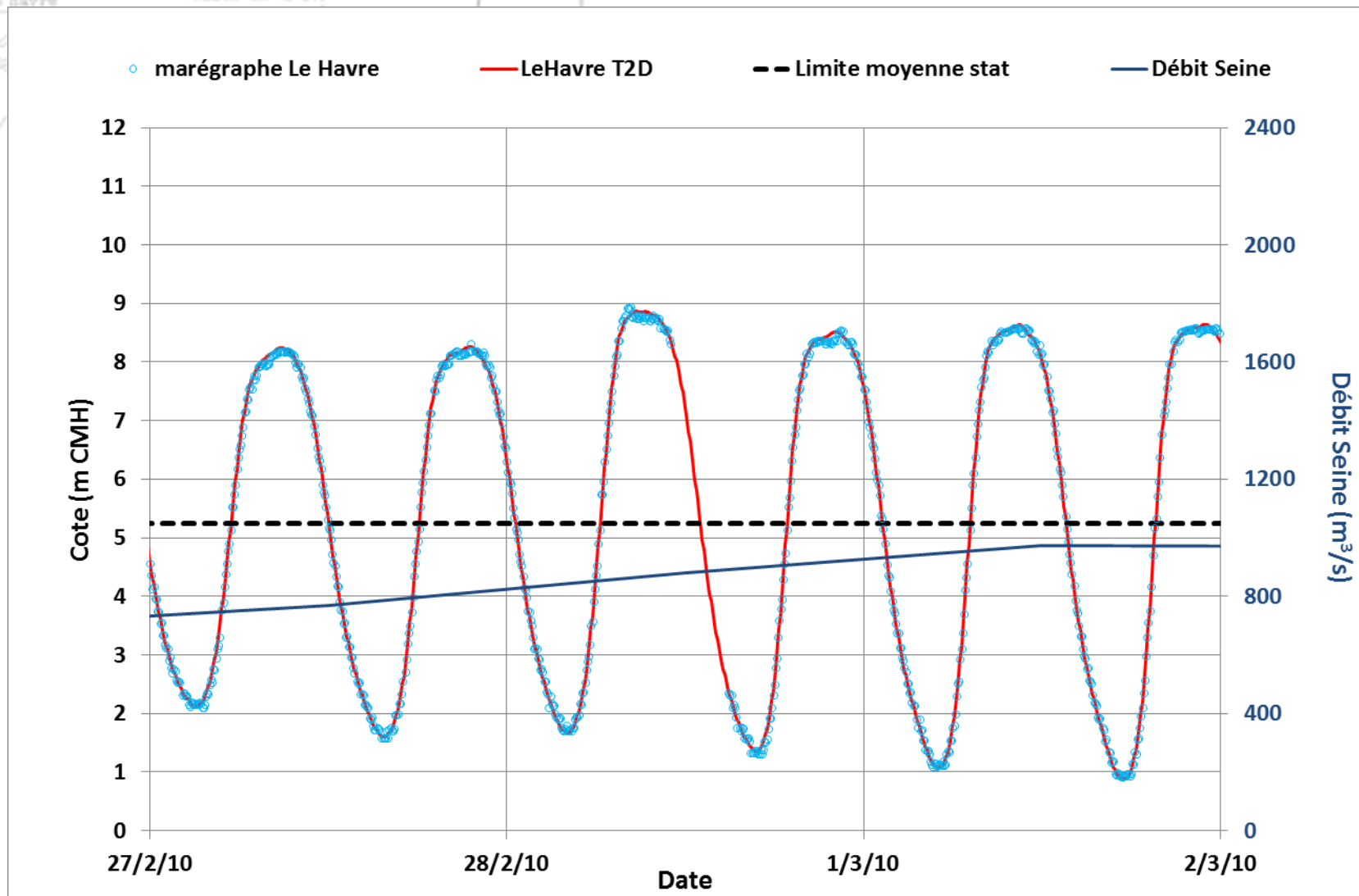
Événement de 2008 [2]



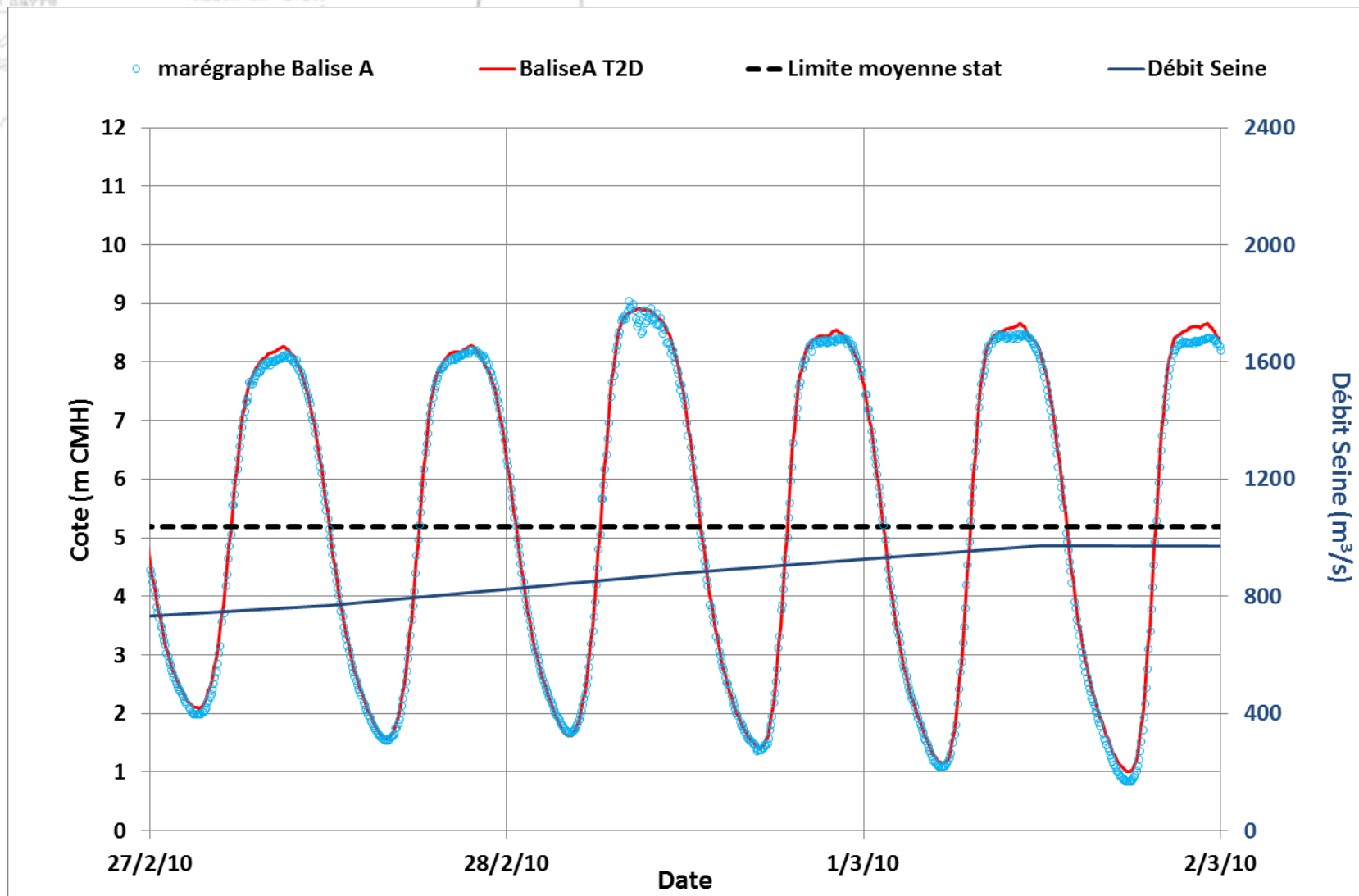


Simulation de tempête 2010 Xynthia

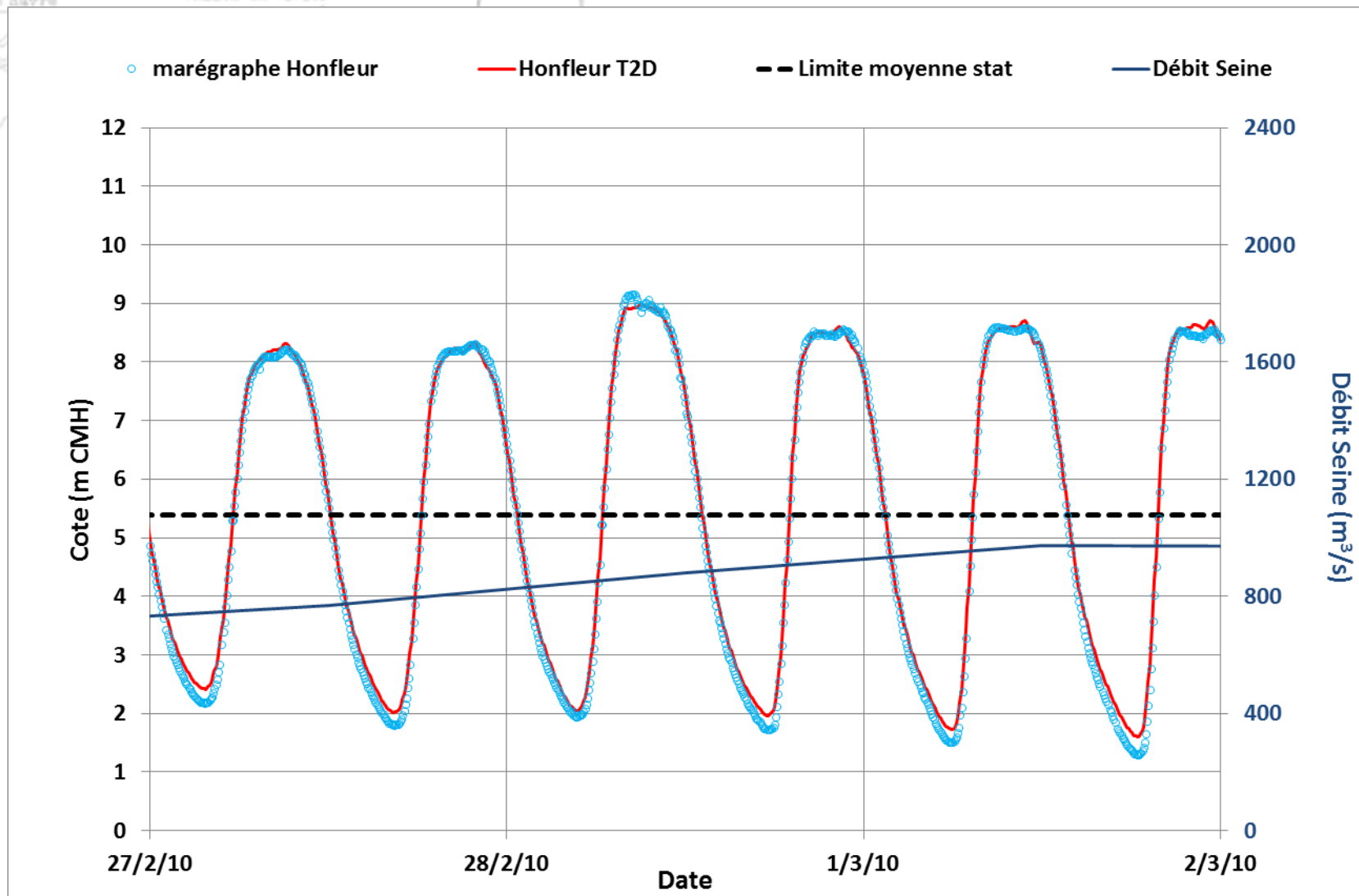
Événement de 2010 : Le Havre



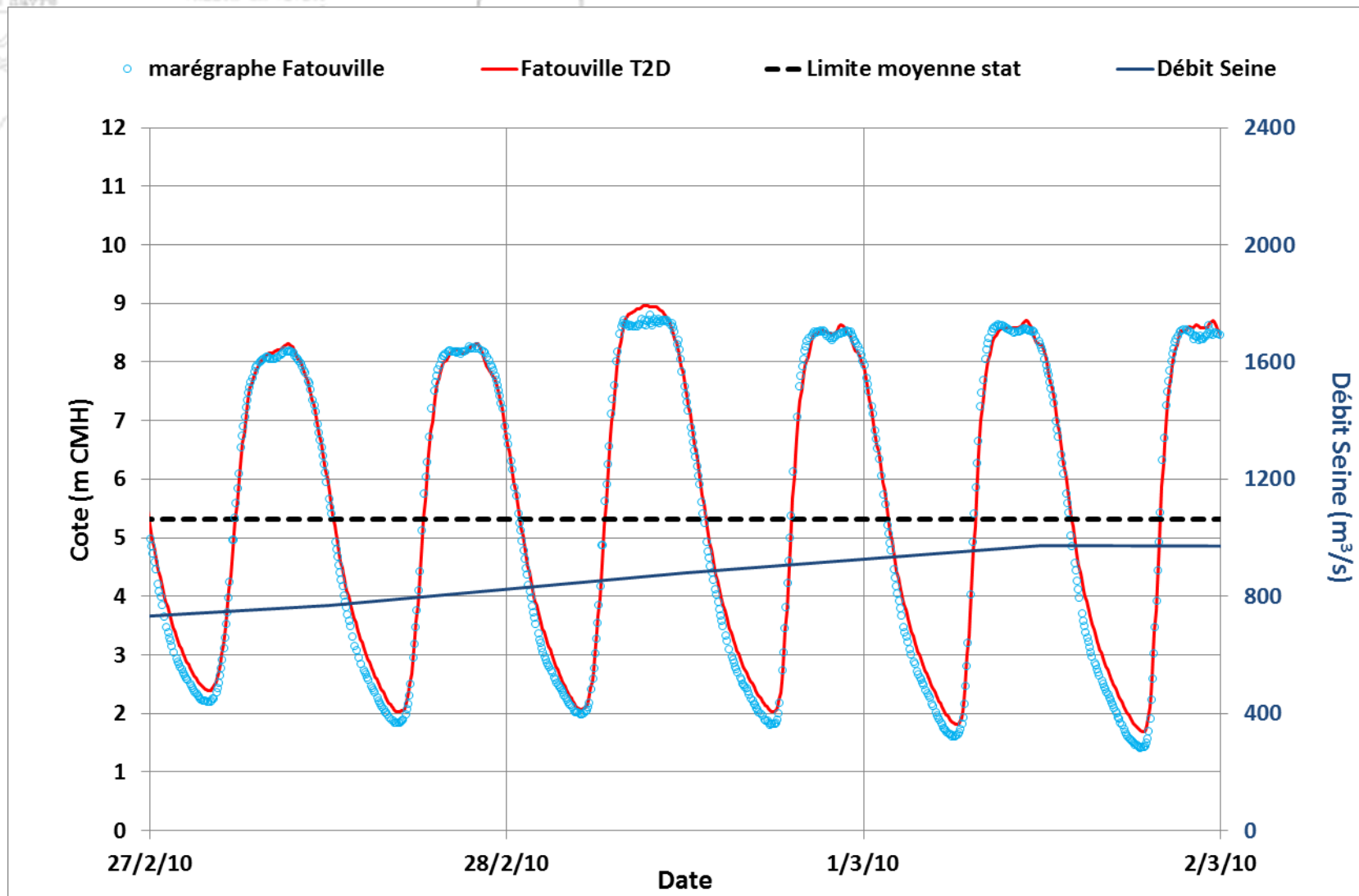
Événement de 2010 : Balise A



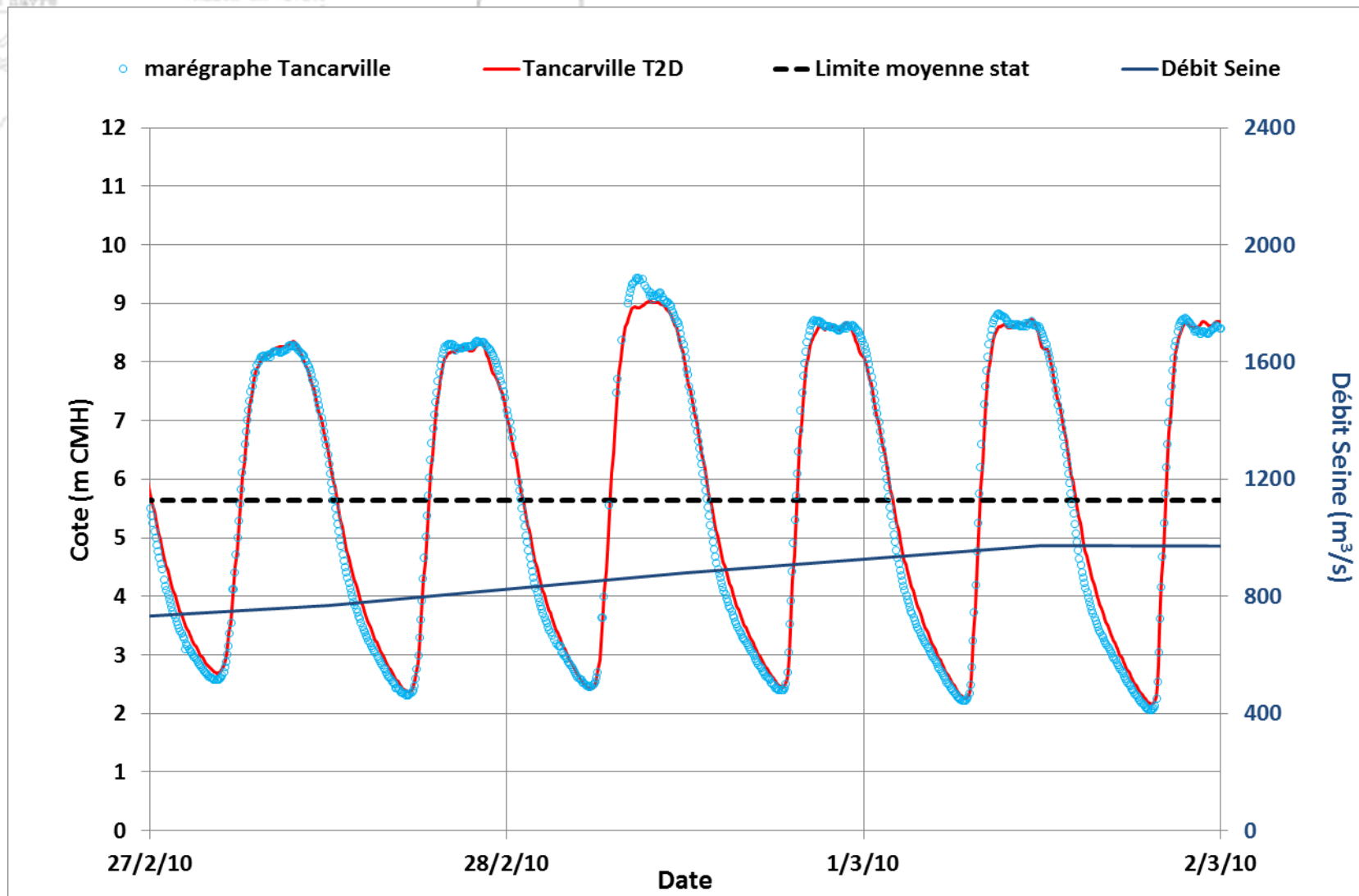
Événement de 2010 : Honfleur



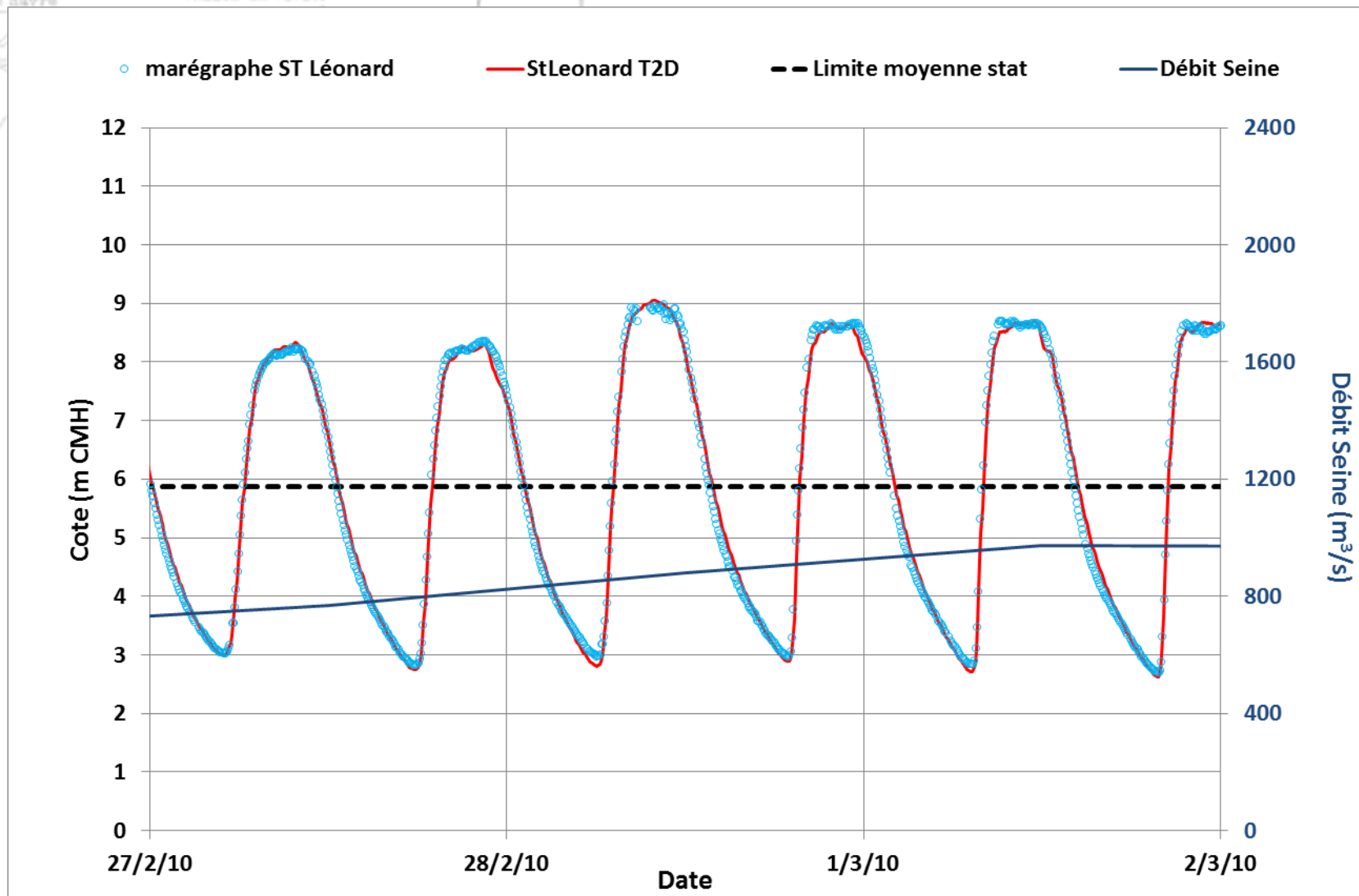
Événement de 2010 : Fatouville



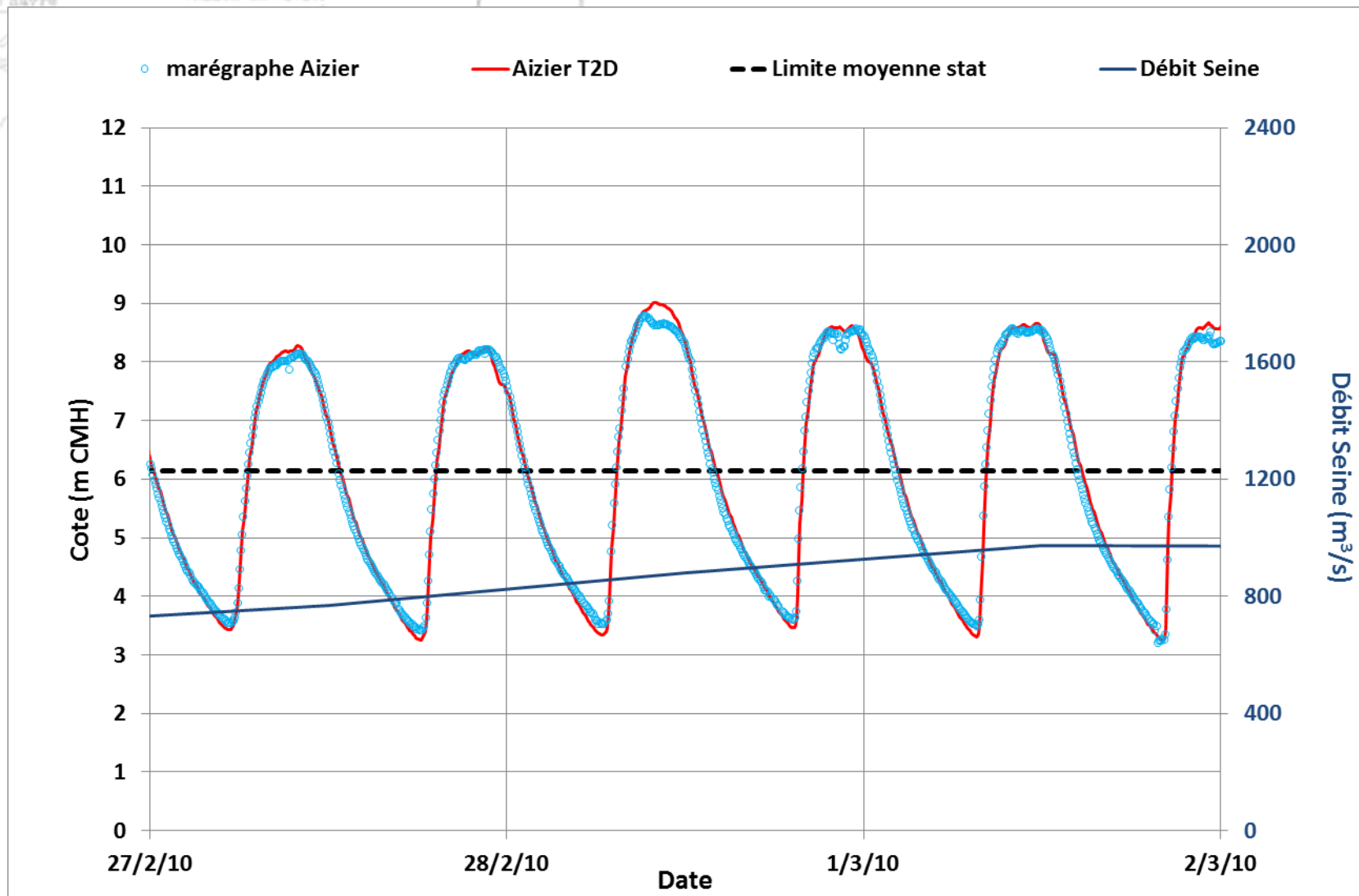
Événement de 2010 : Tancarville



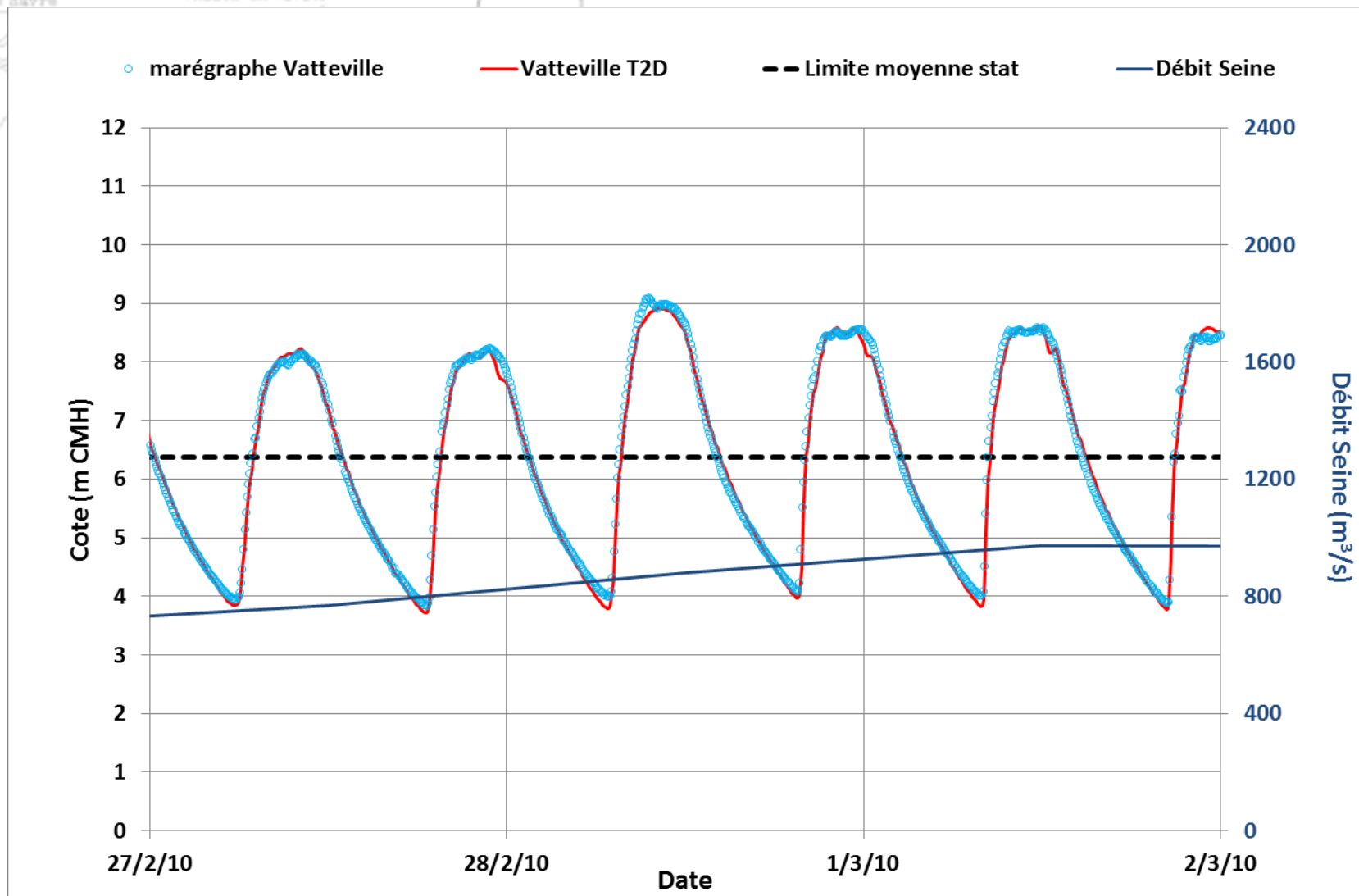
Événement de 2010 : St Léonard



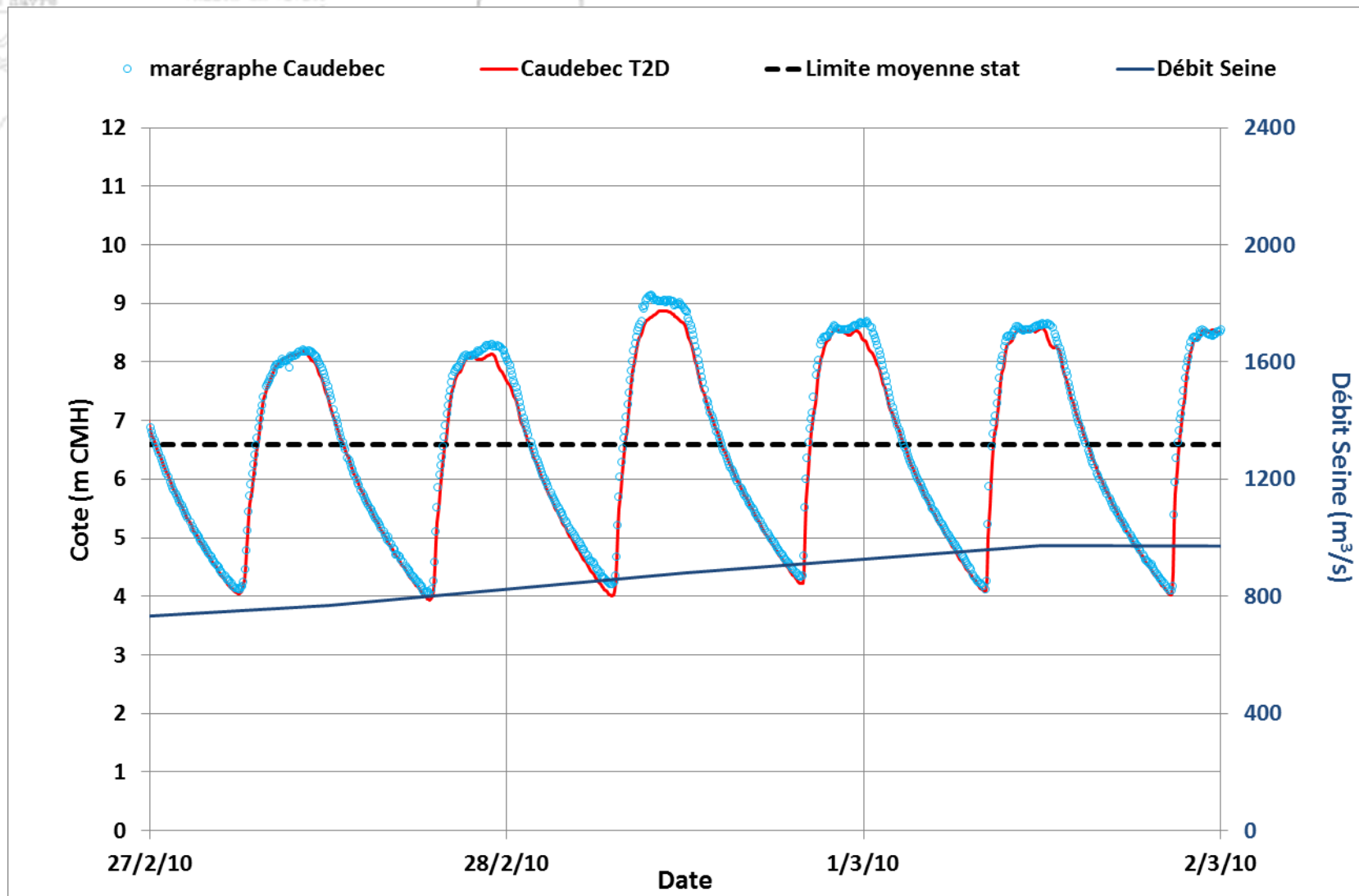
Événement de 2010 : Aizier



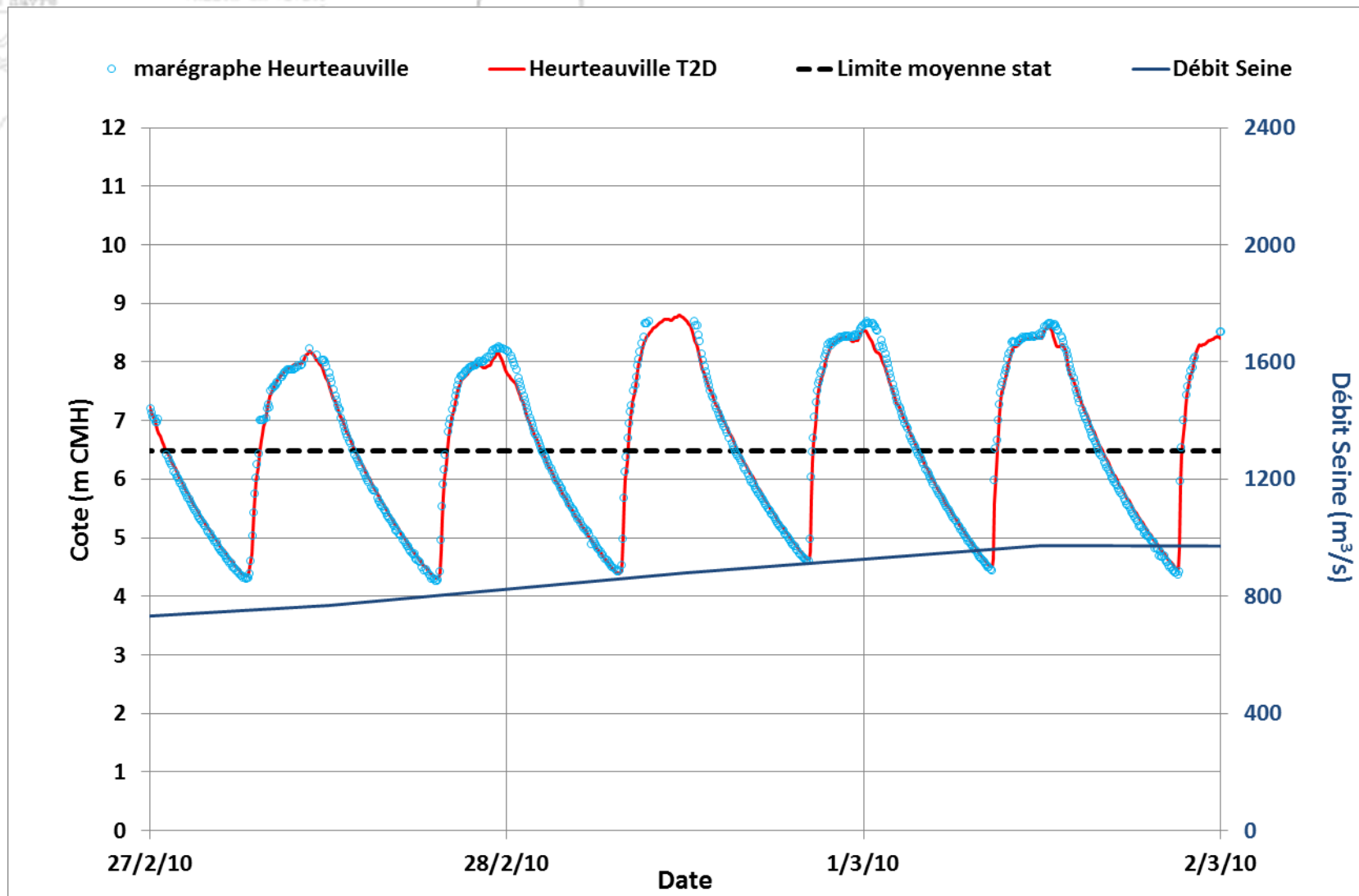
Événement de 2010 : Vatteville



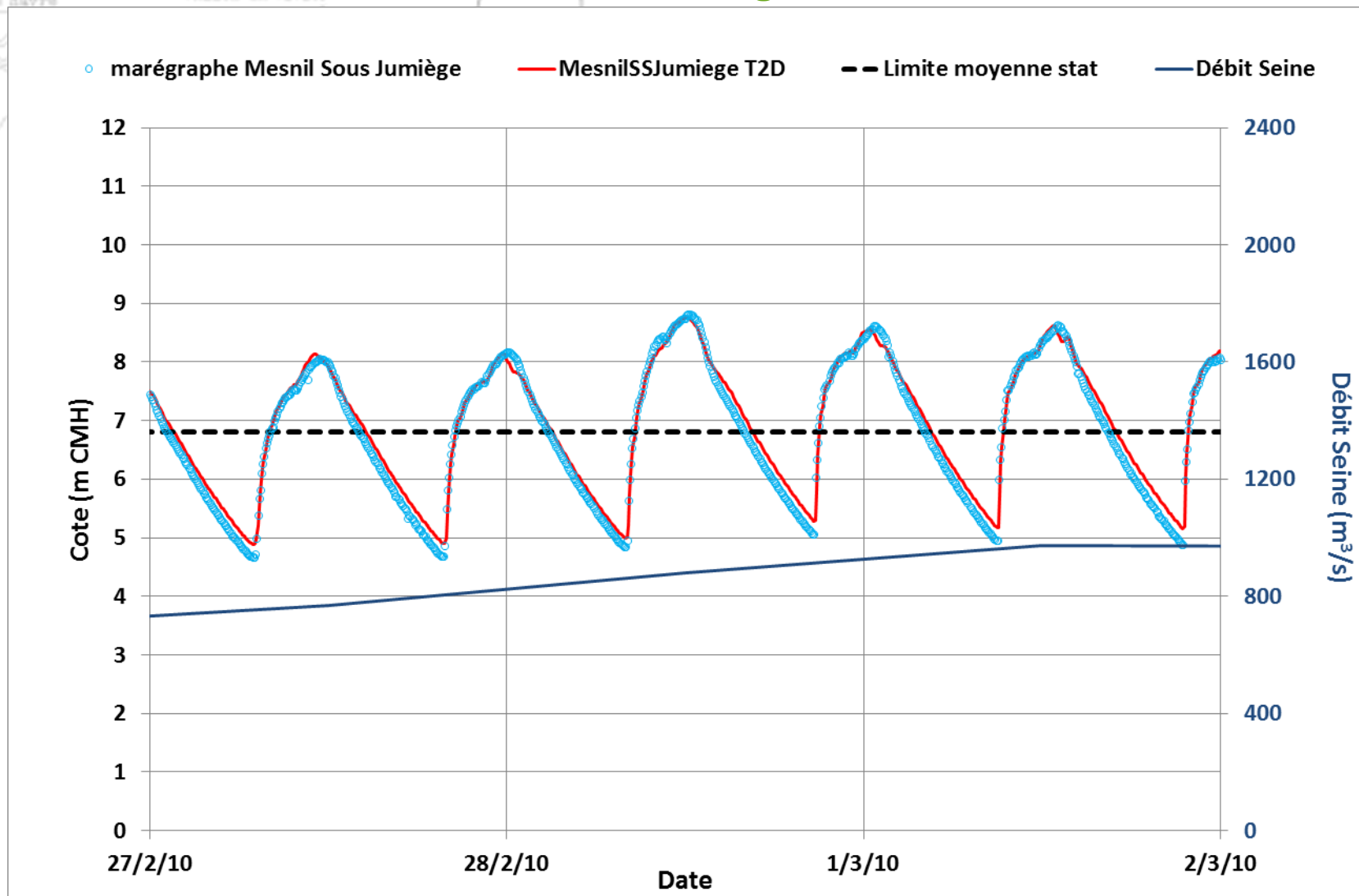
Événement de 2010 : Caudebec



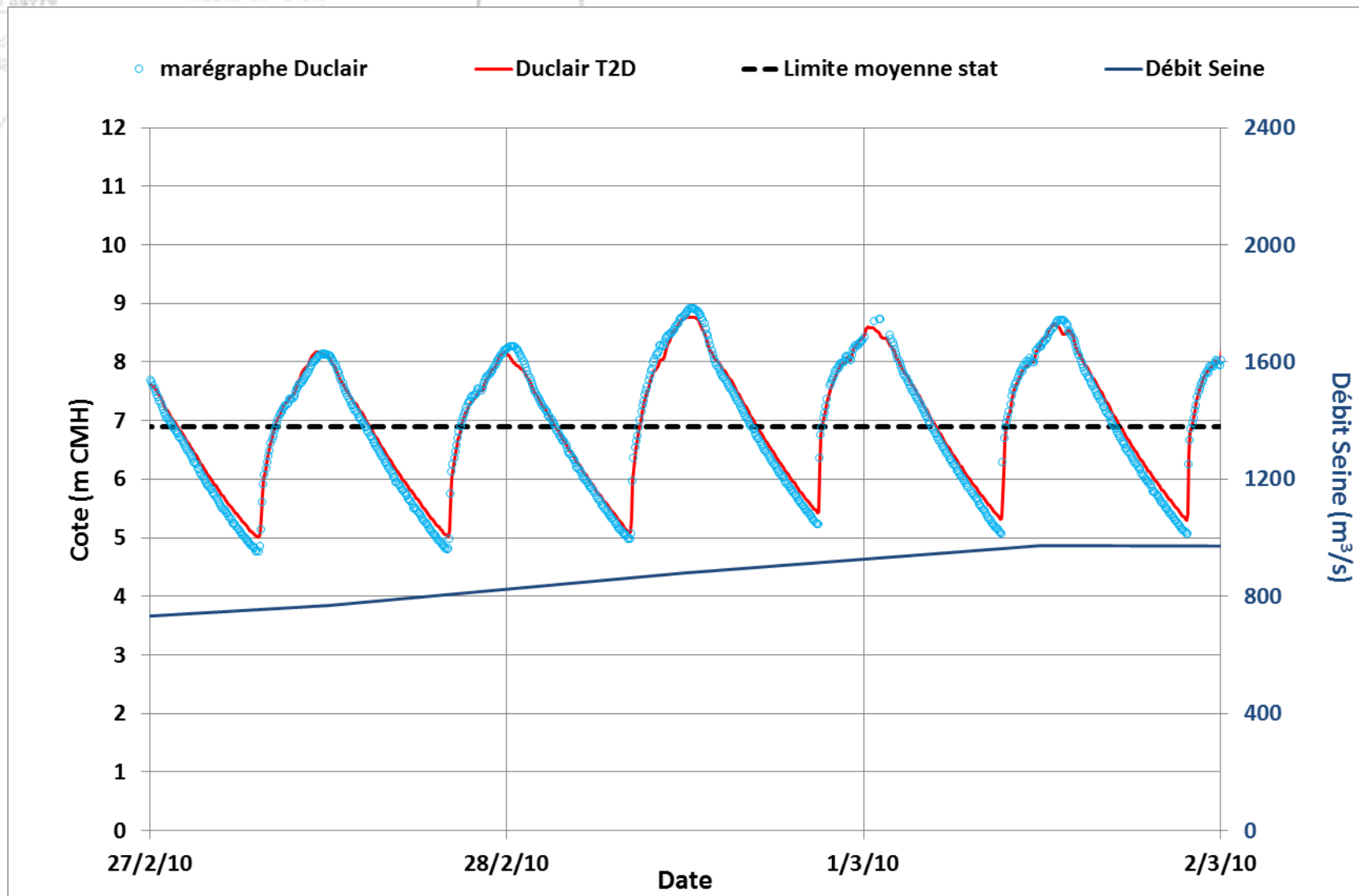
Événement de 2010 : Heurteauville



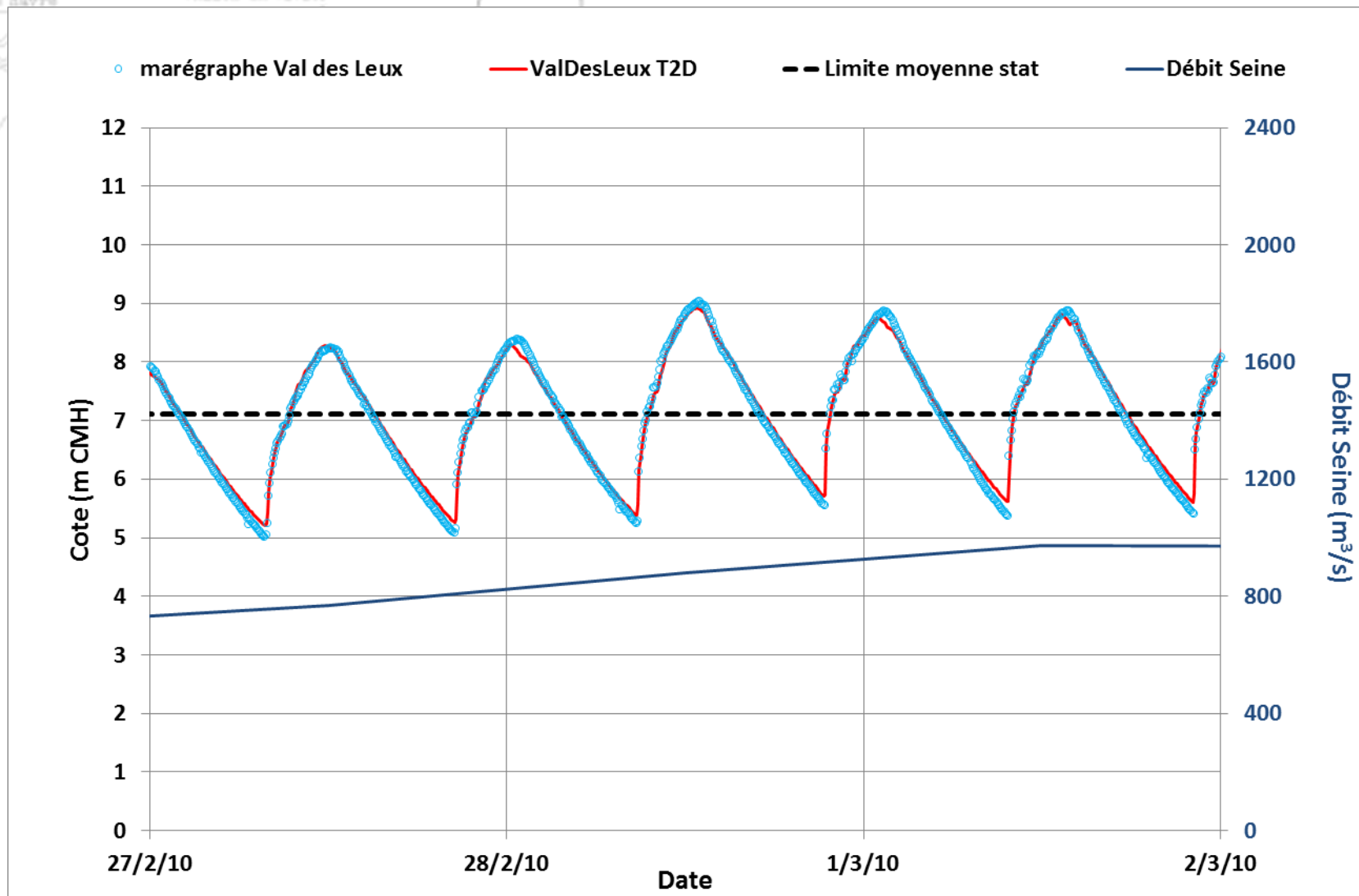
Événement de 2010 : Mesnil-sous-Jumièges



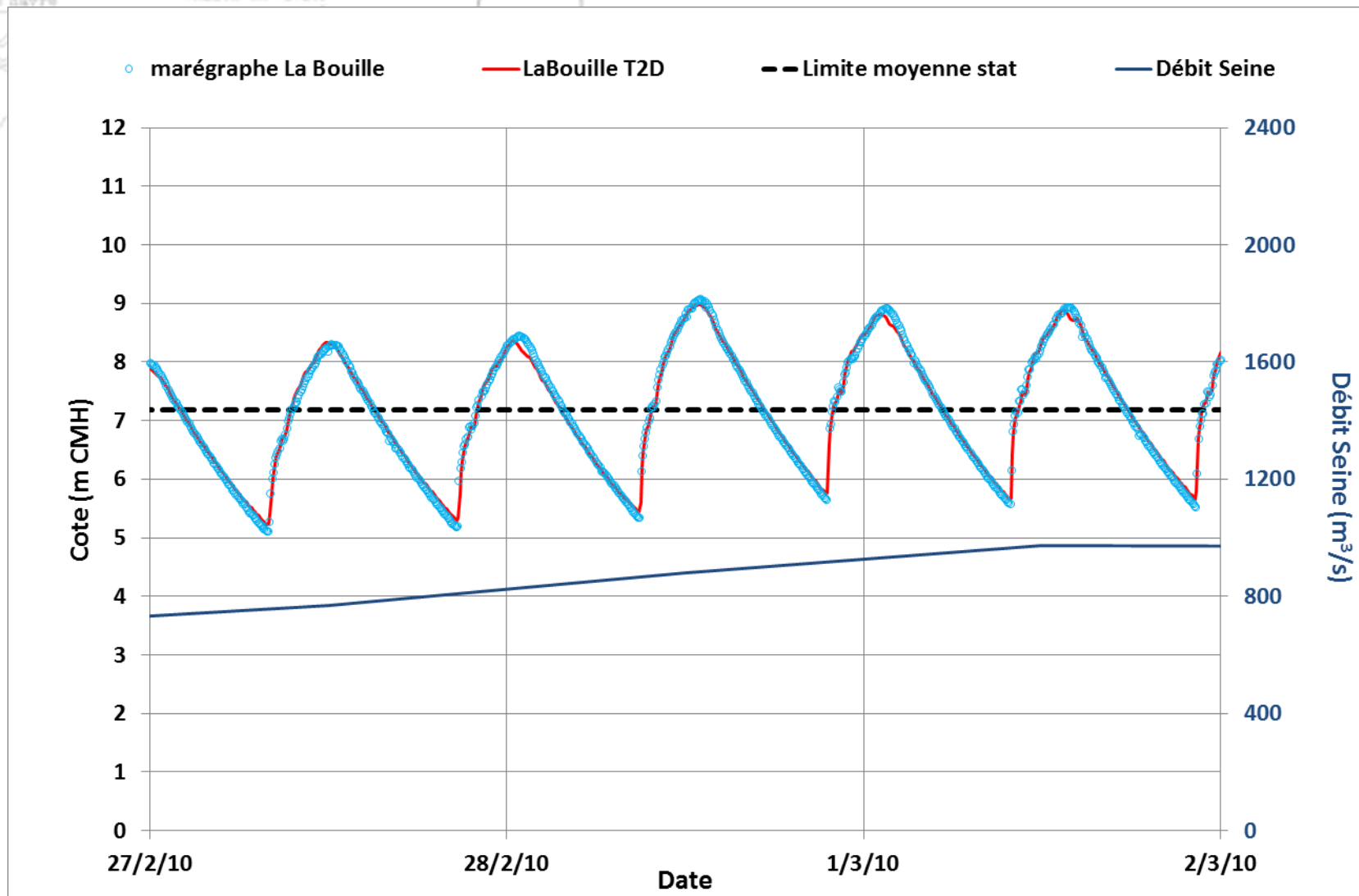
Événement de 2010 : Duclair



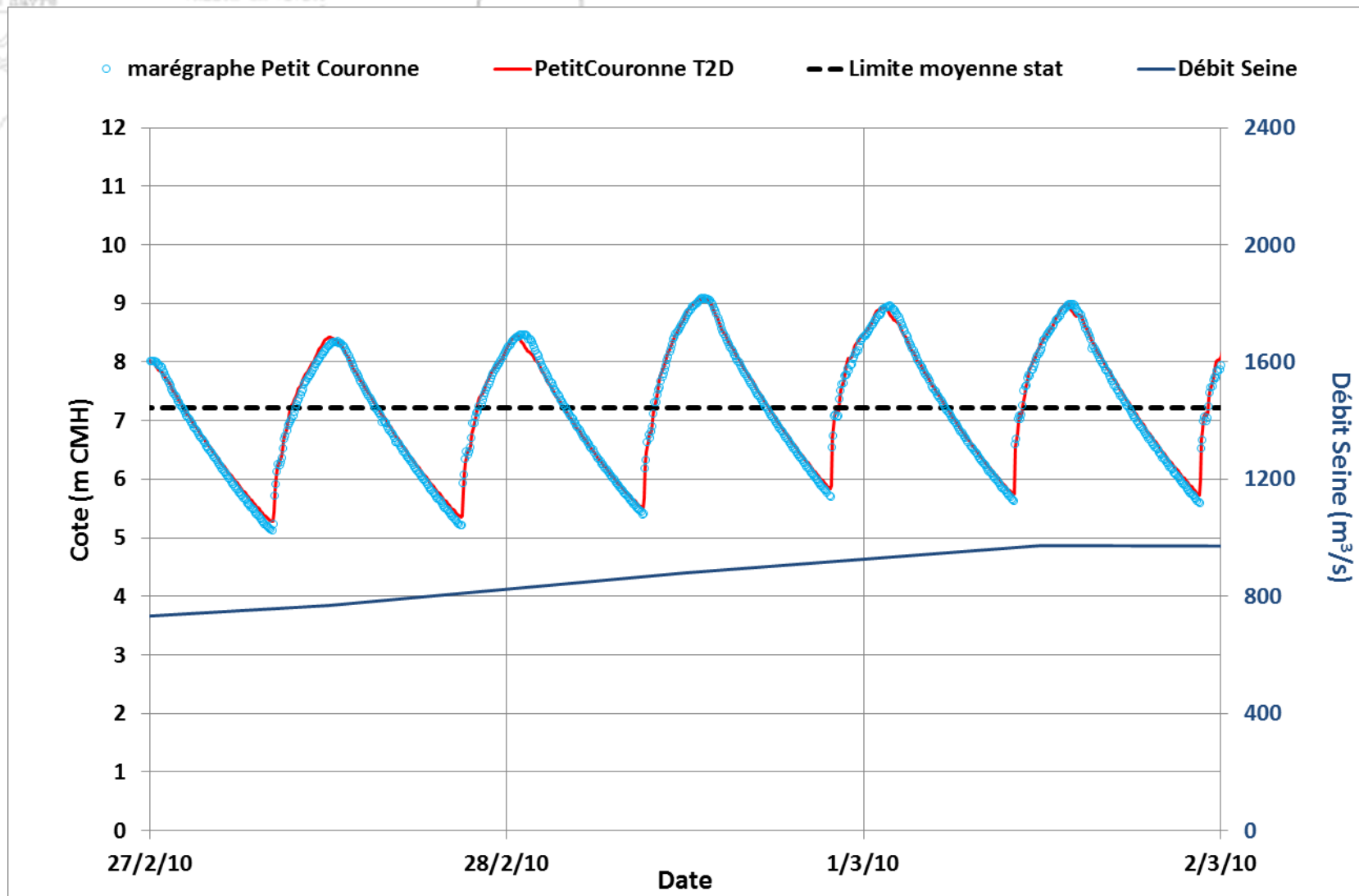
Événement de 2010 : Val-des-Leux



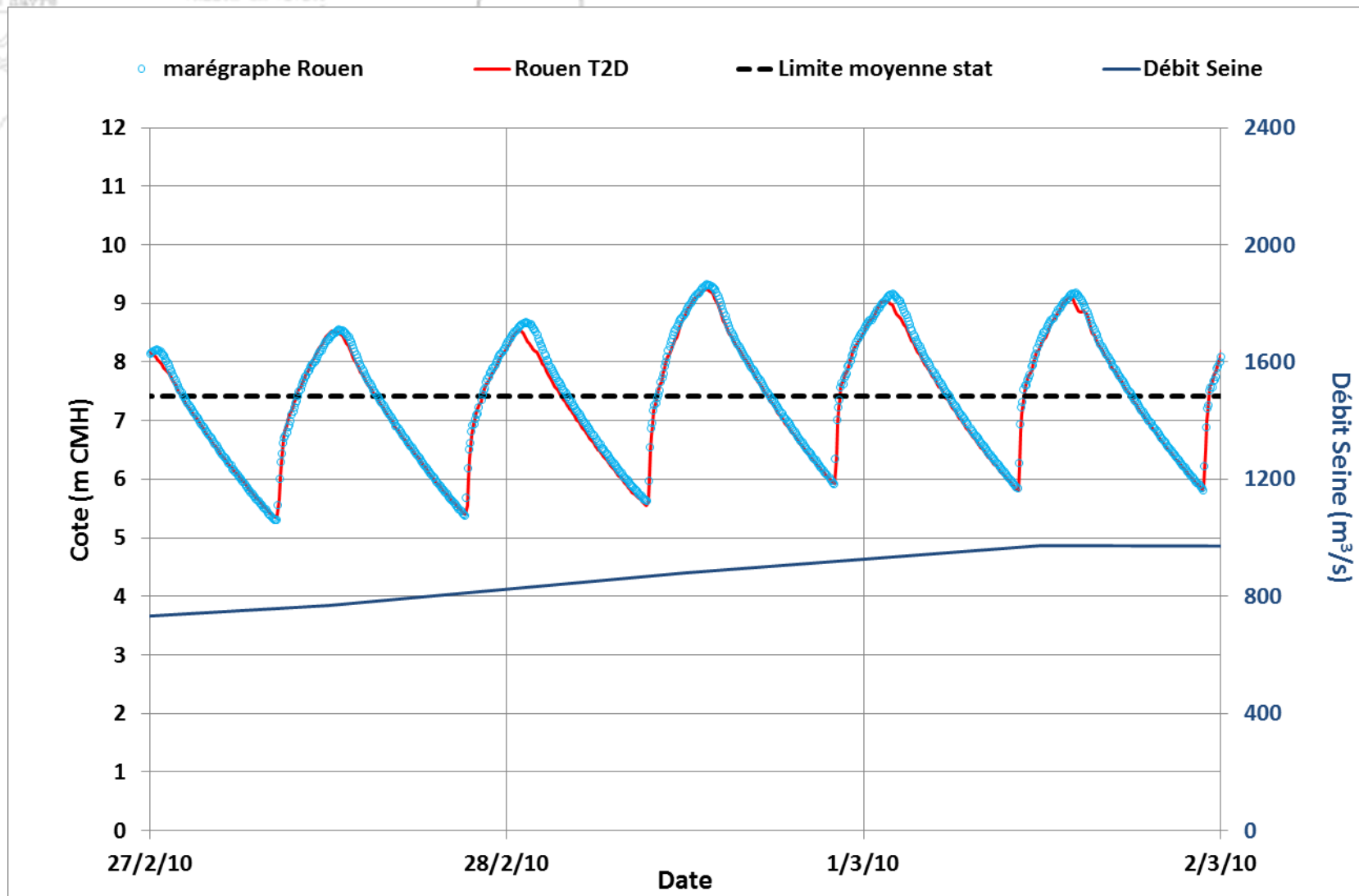
Événement de 2010 : La Bouille



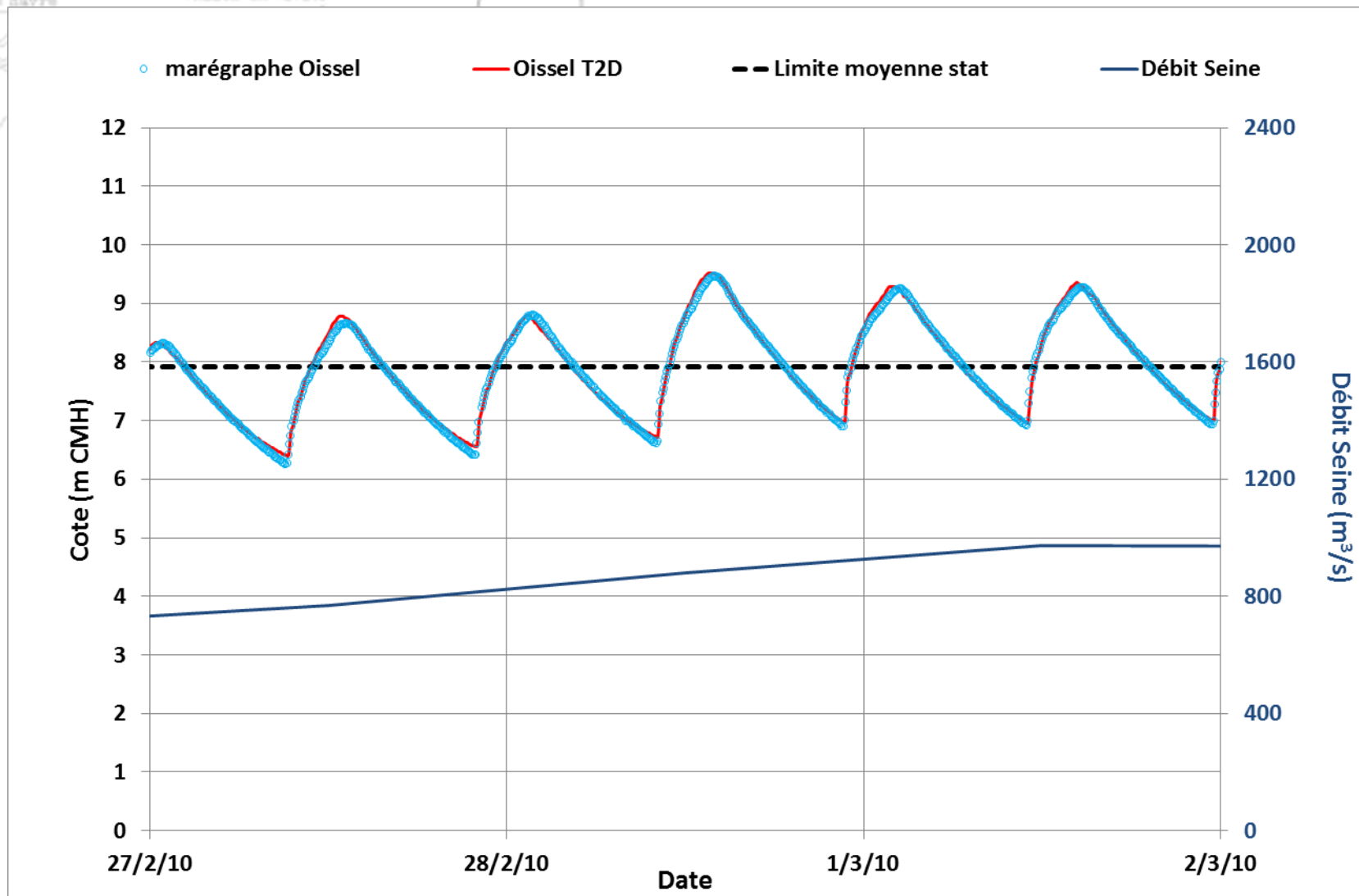
Événement de 2010 : Petit Couronne



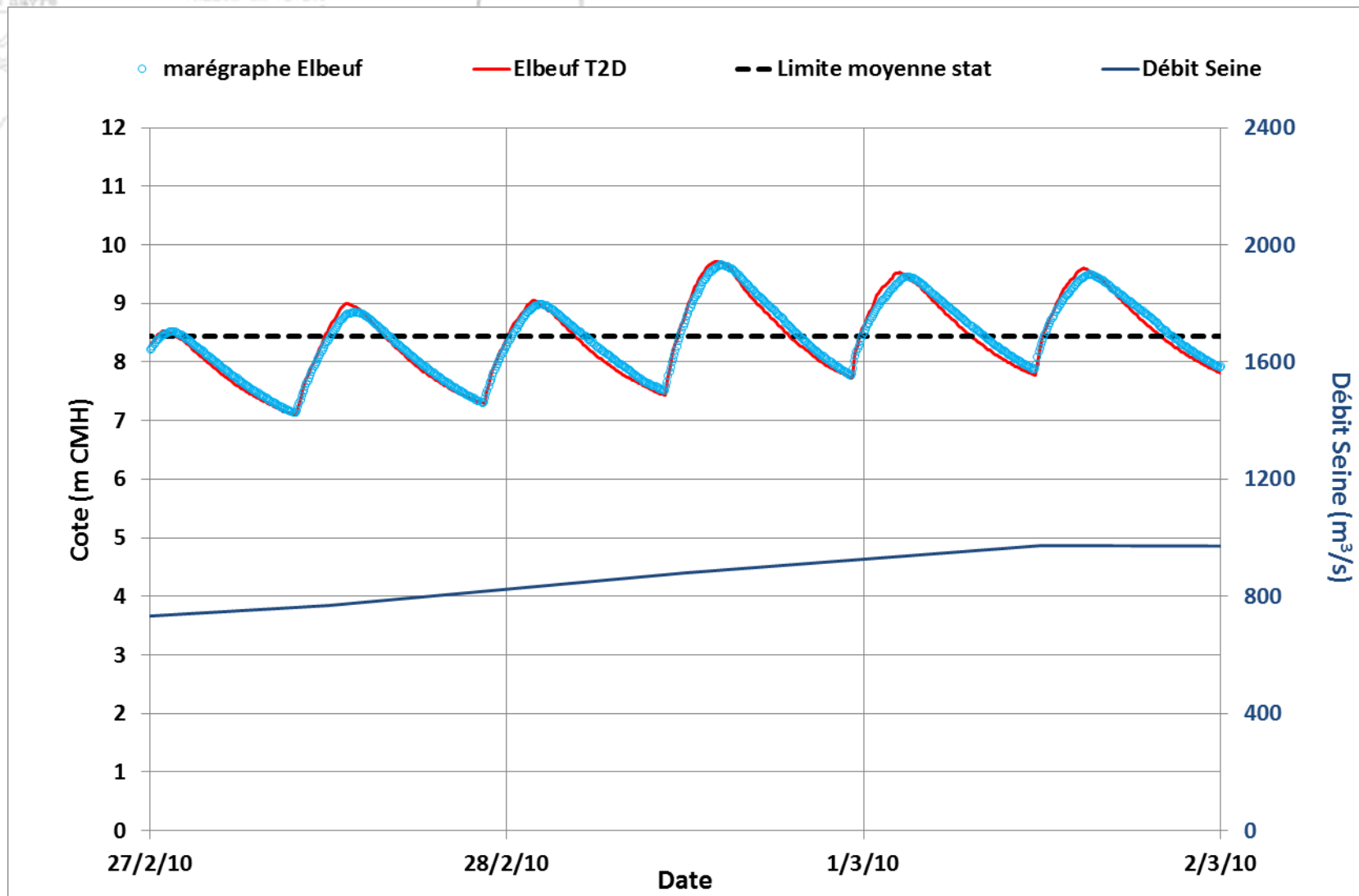
Événement de 2010 : Rouen



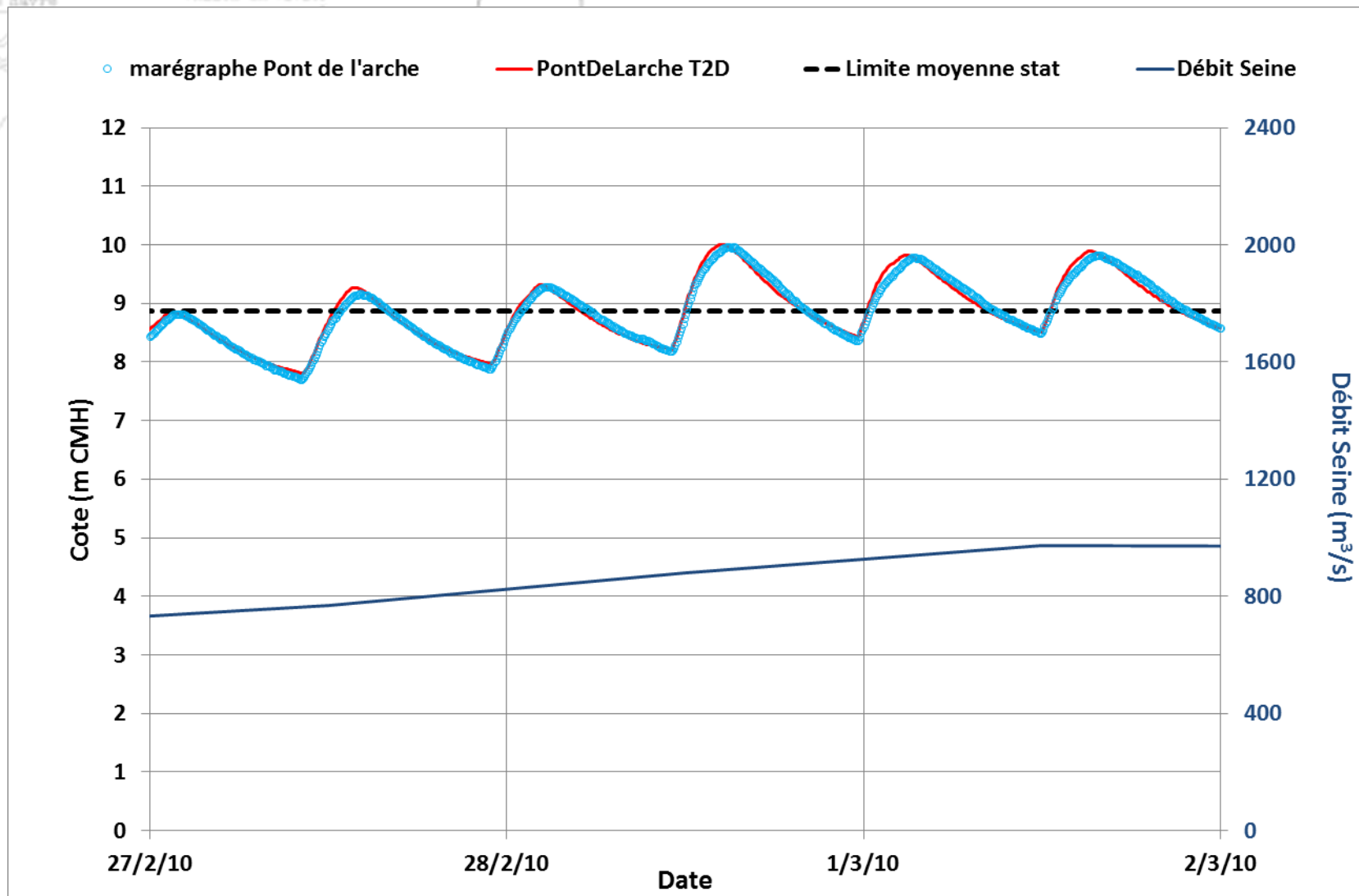
Événement de 2010 : Oissel



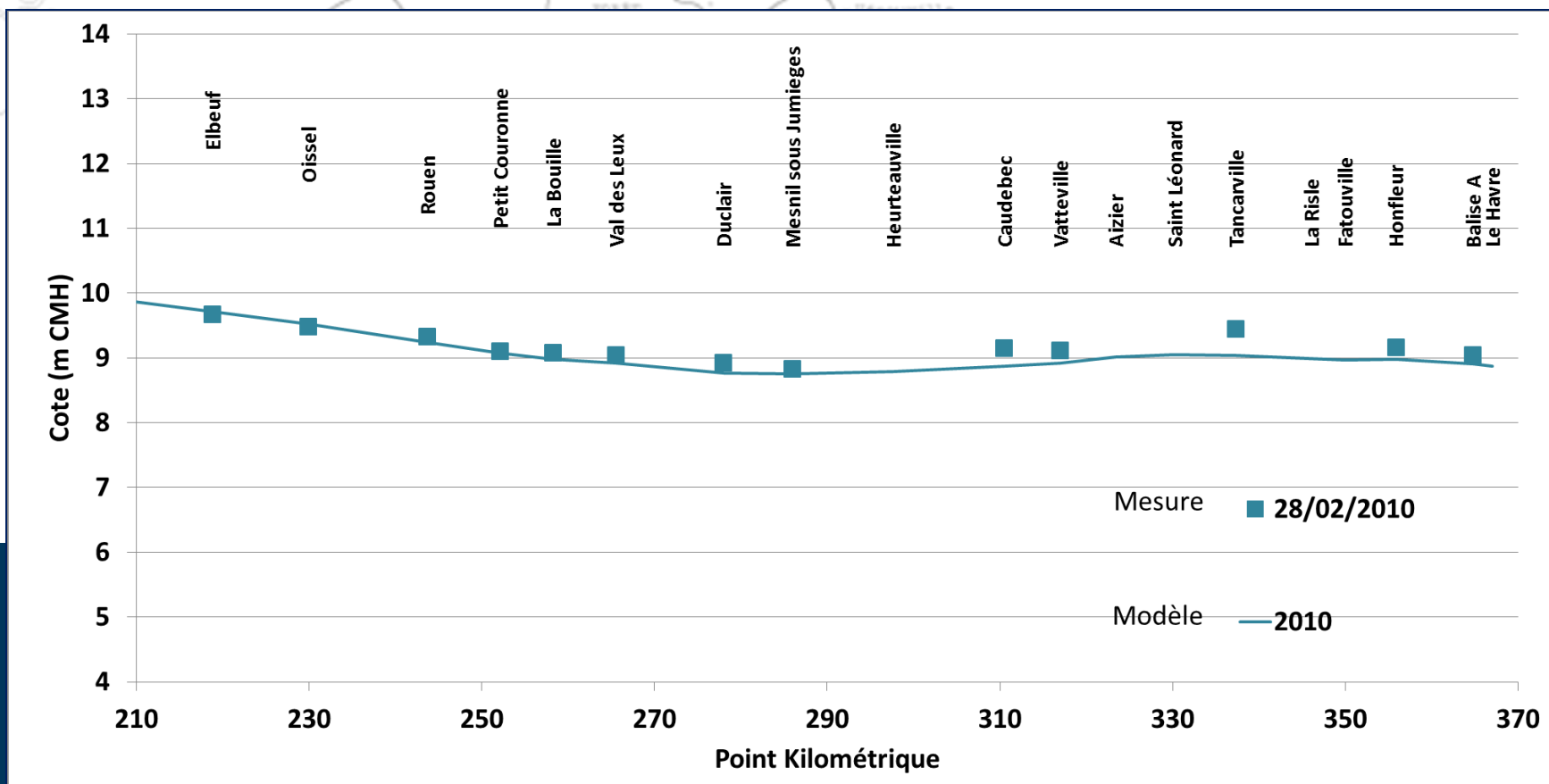
Événement de 2010 : Elbeuf



Événement de 2010 : Pont-de-l'Arche



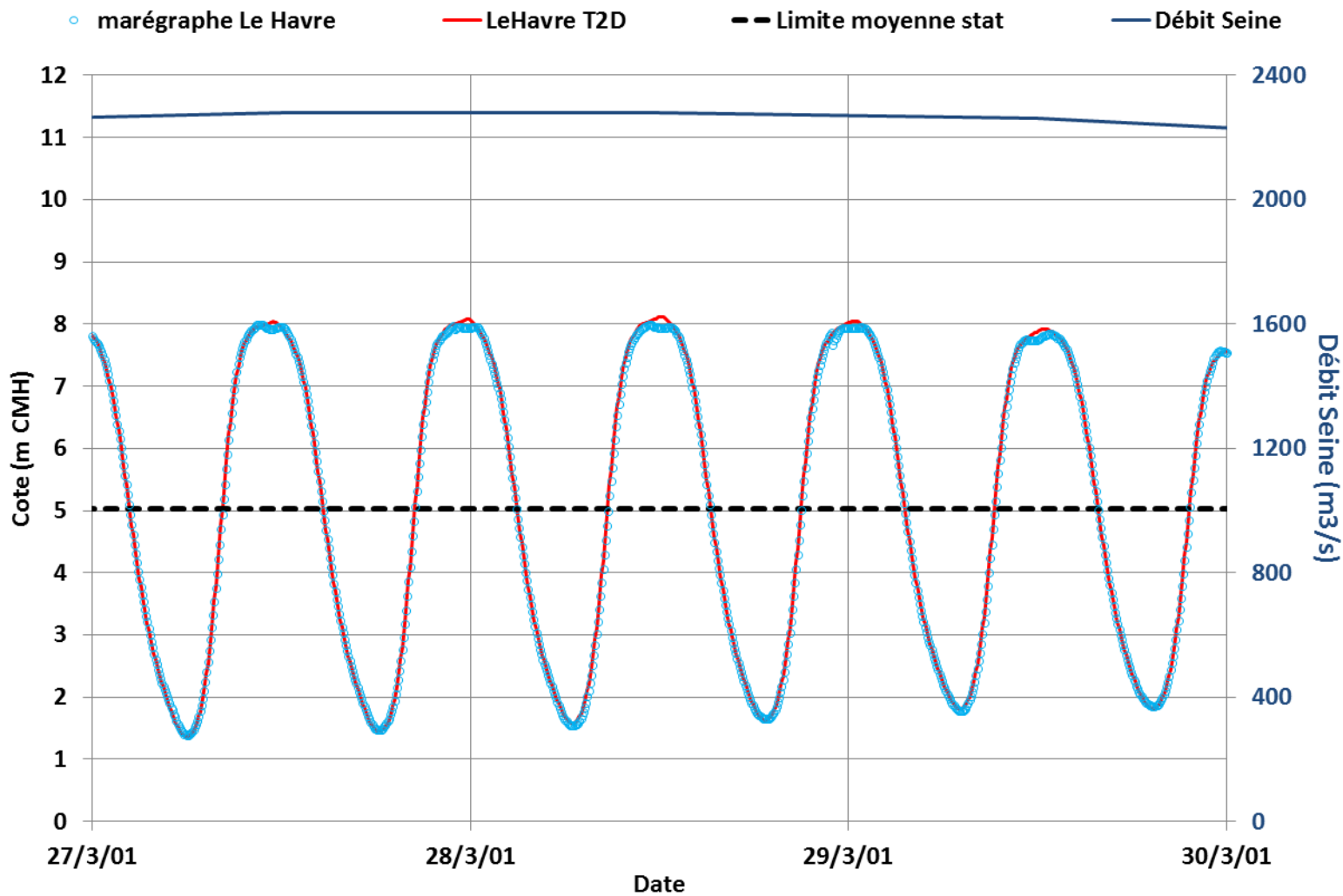
Événement de 2010



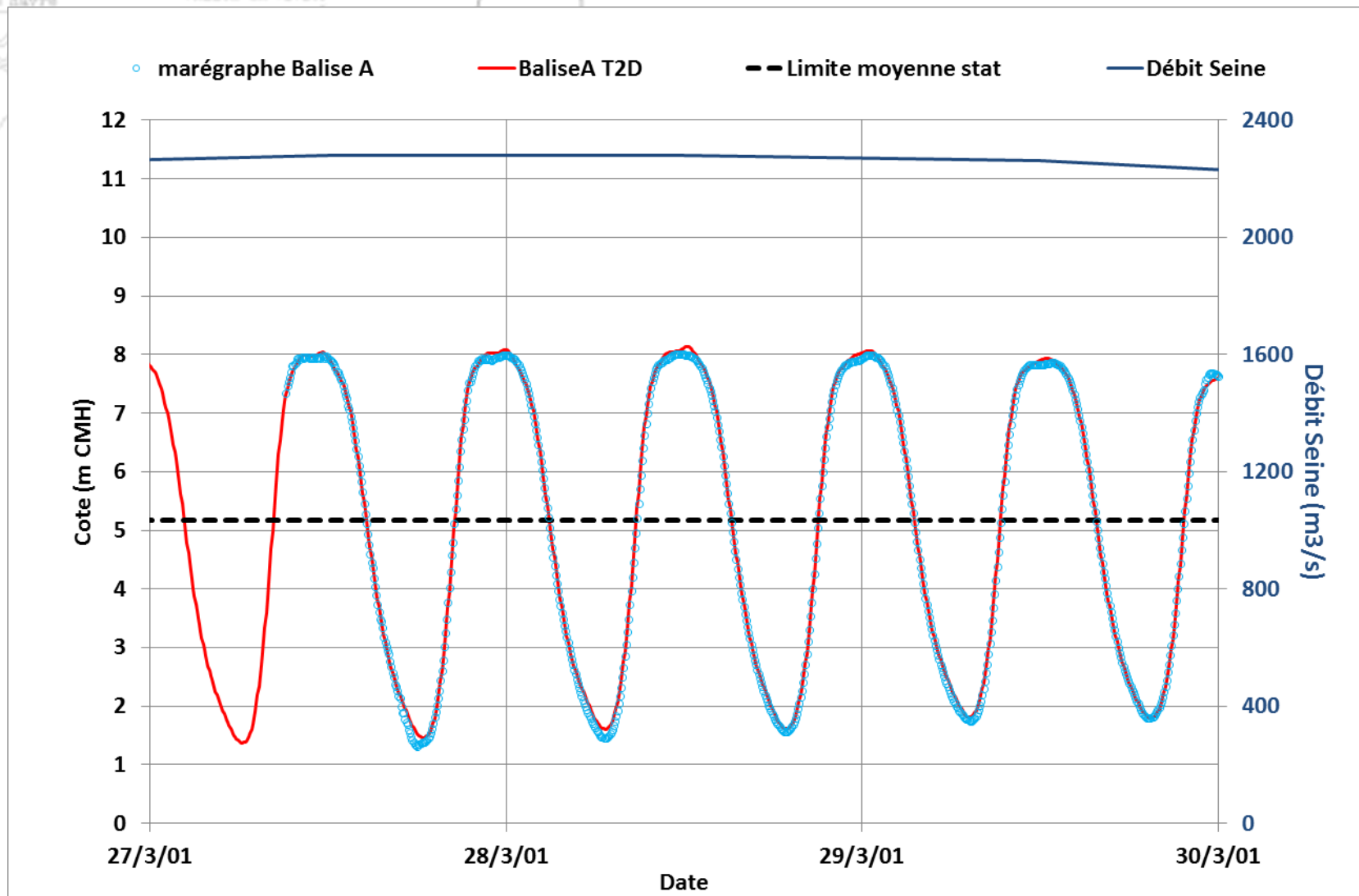


Simulation de crue 2001

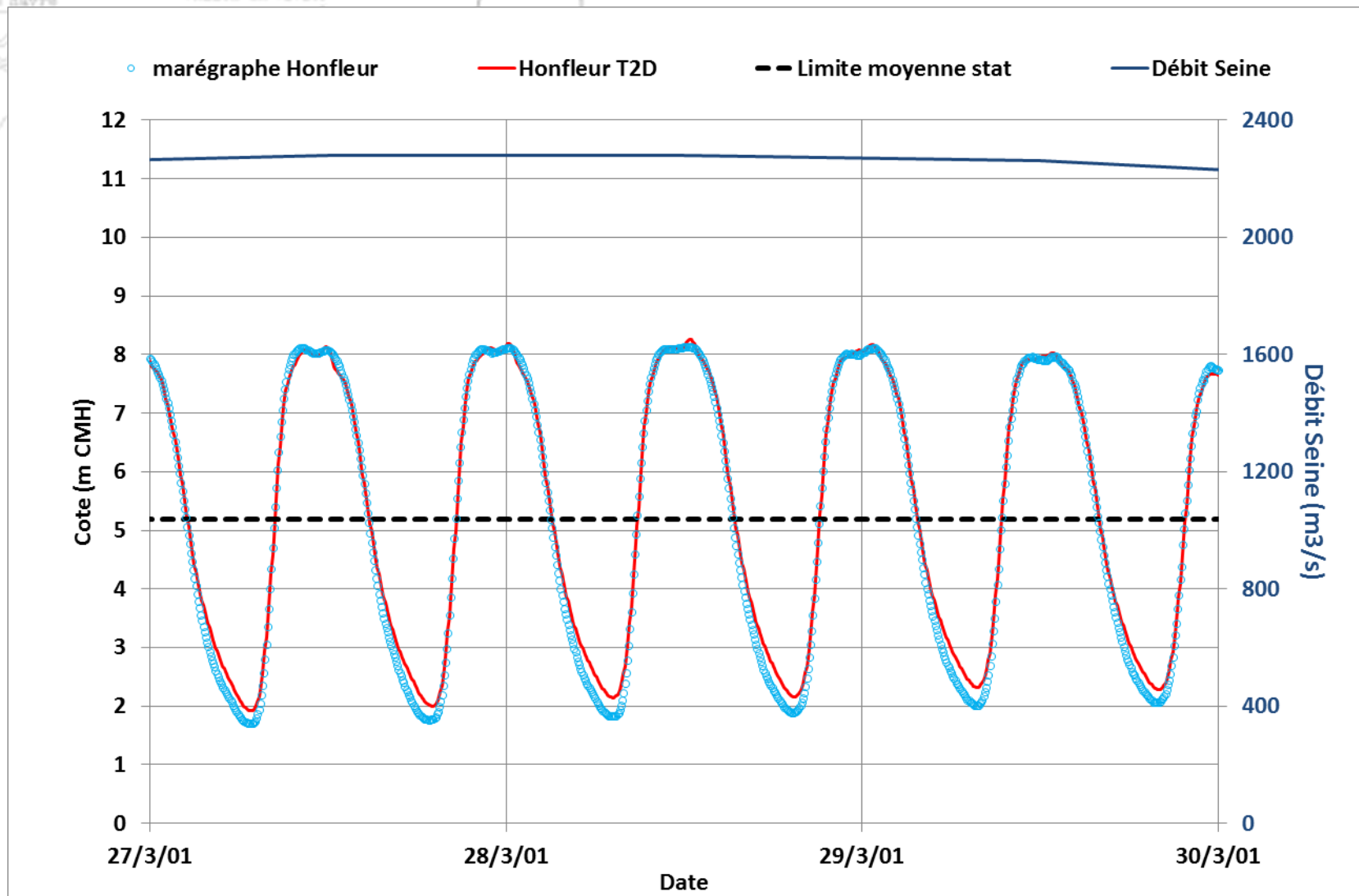
Événement de 2001 : Le Havre



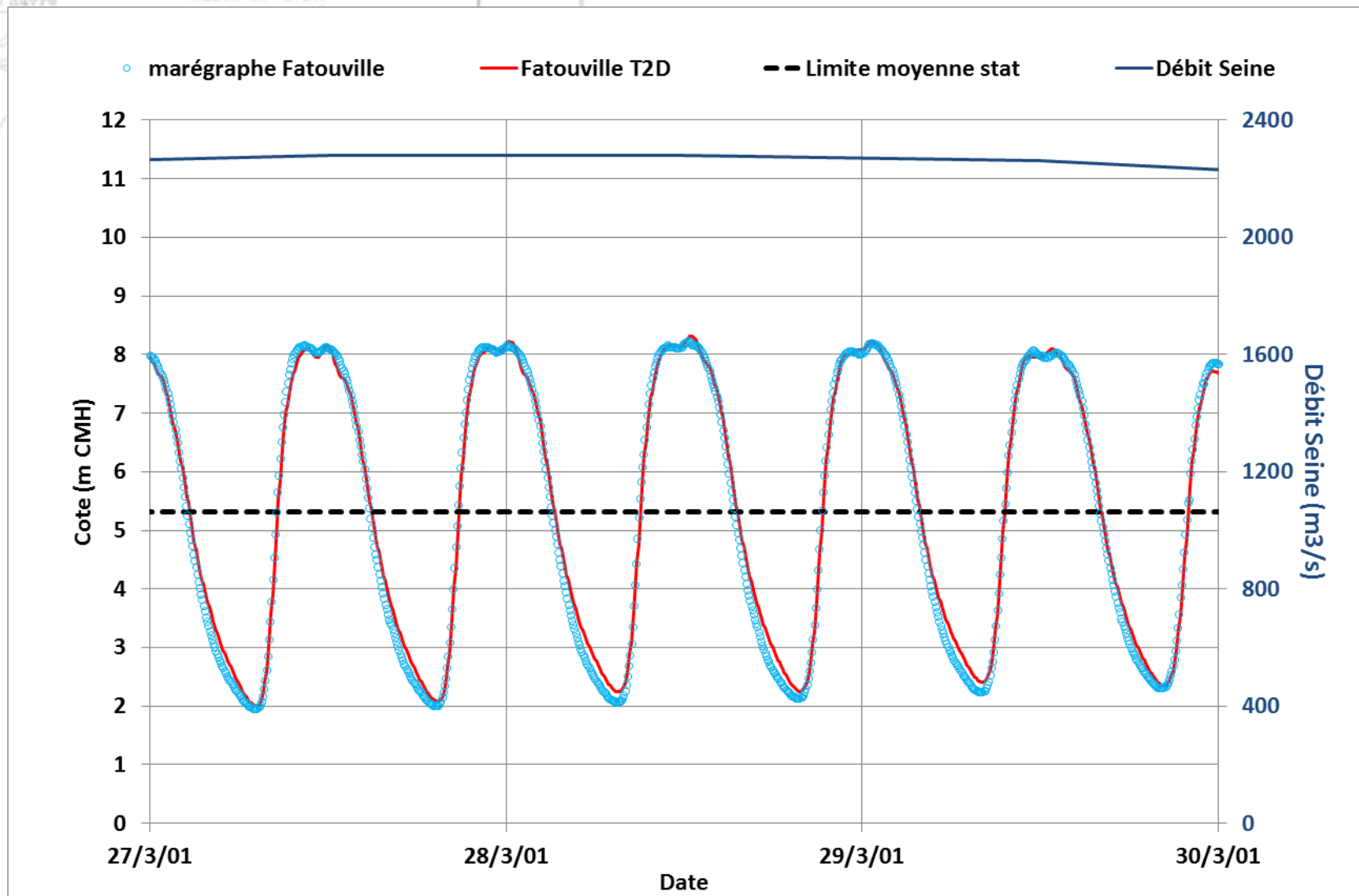
Événement de 2001 : Balise A



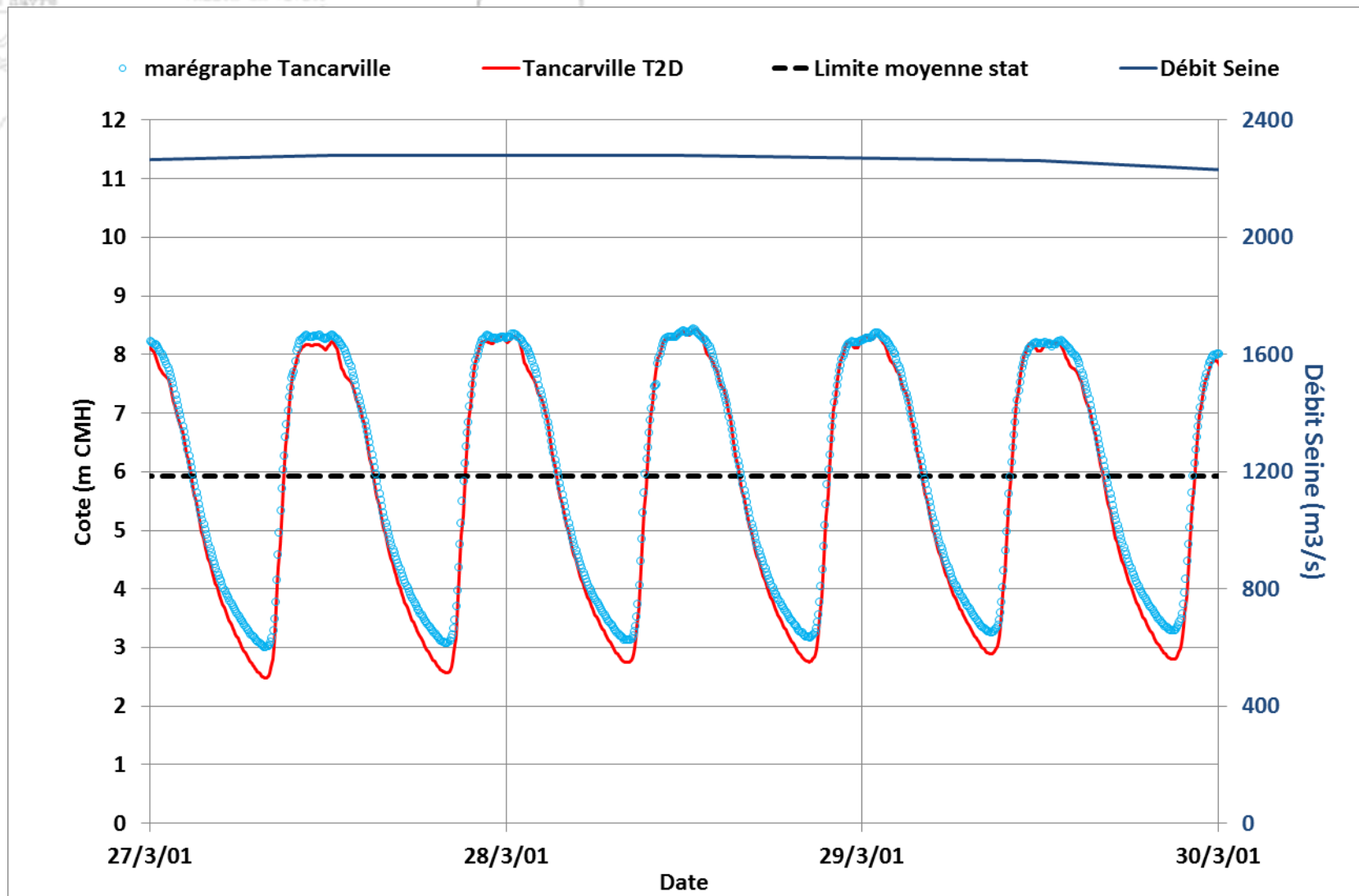
Événement de 2001 : Honfleur



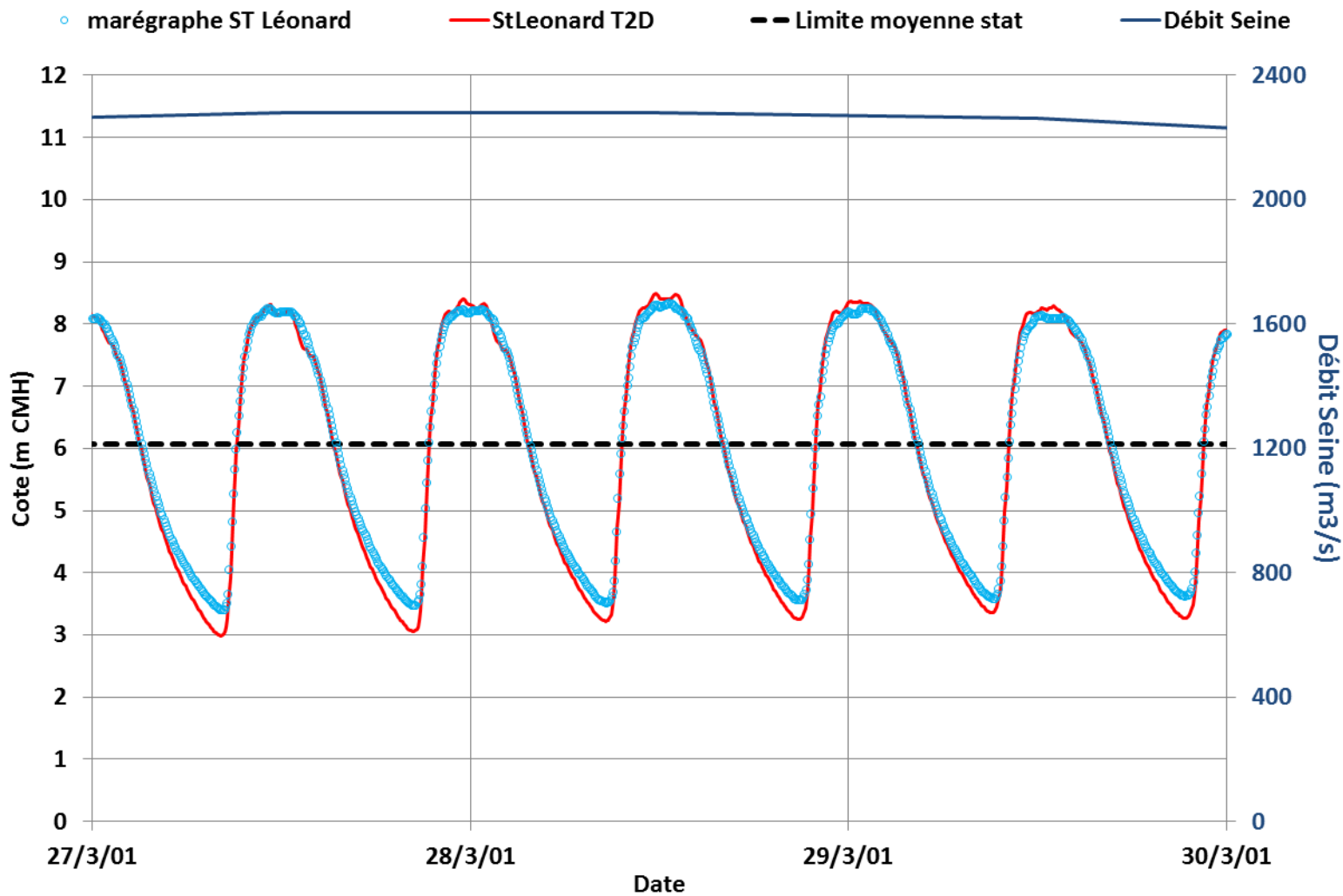
Événement de 2001 : Fatouville



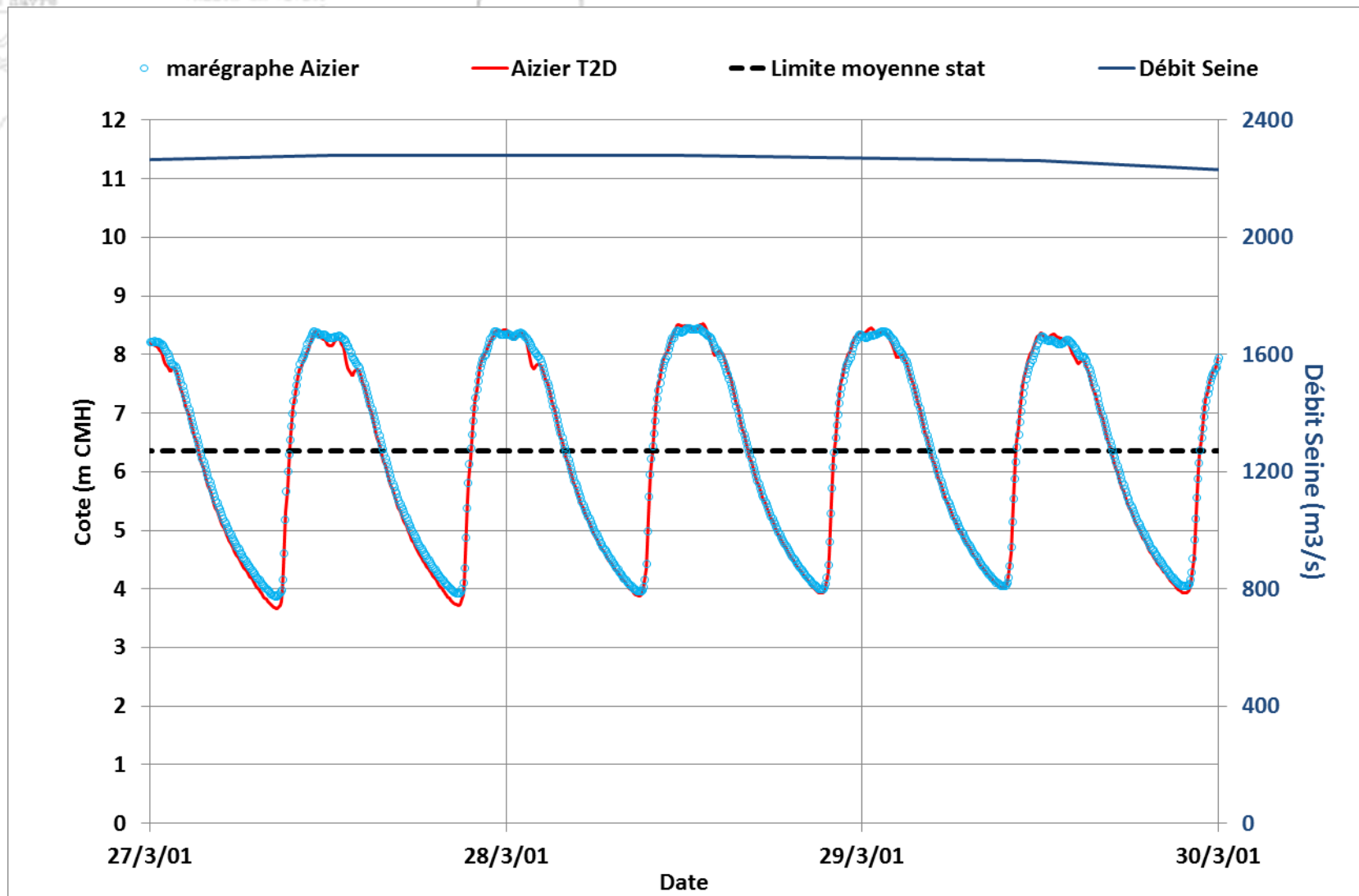
Événement de 2001 : Tancarville



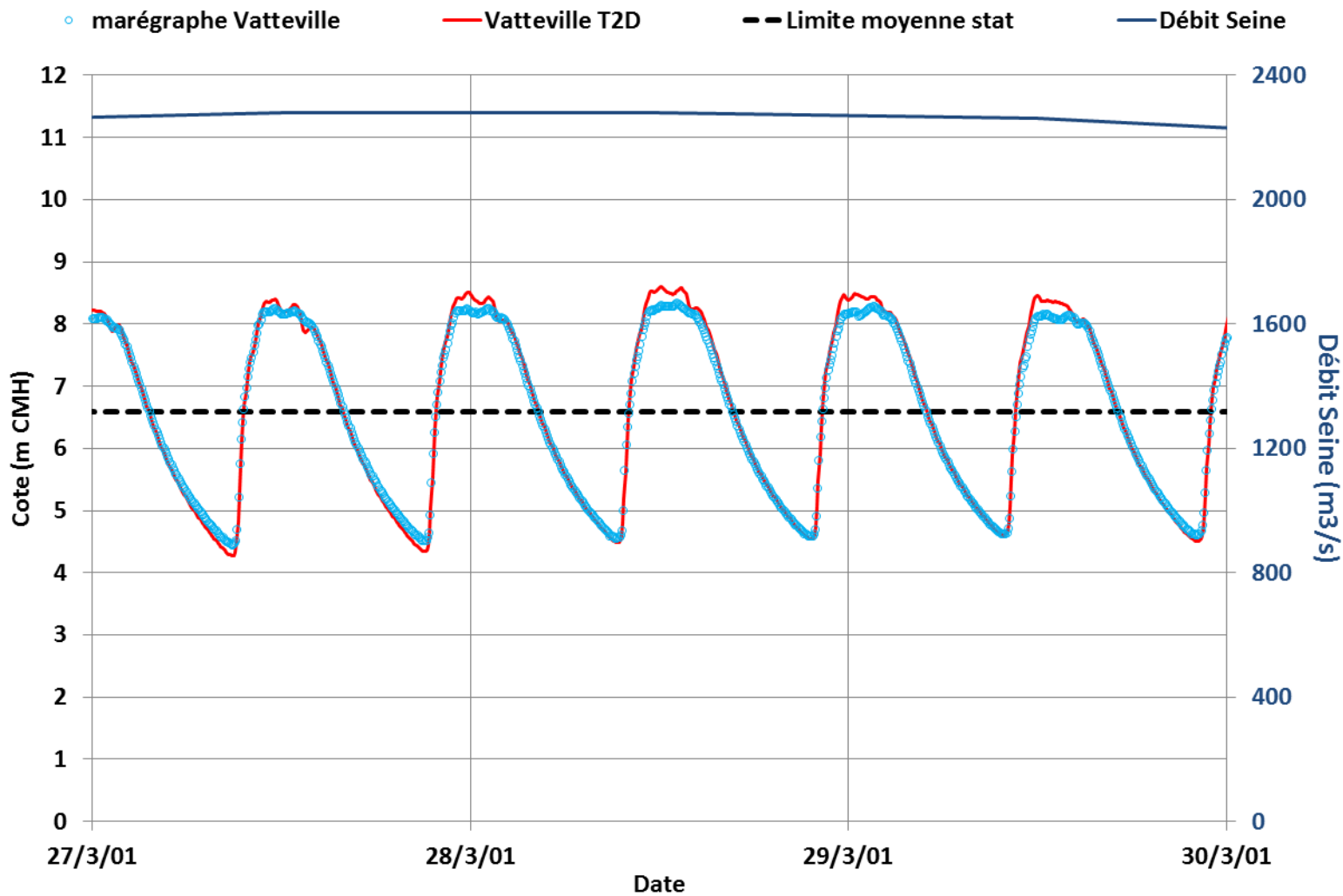
Événement de 2001 : St Léonard



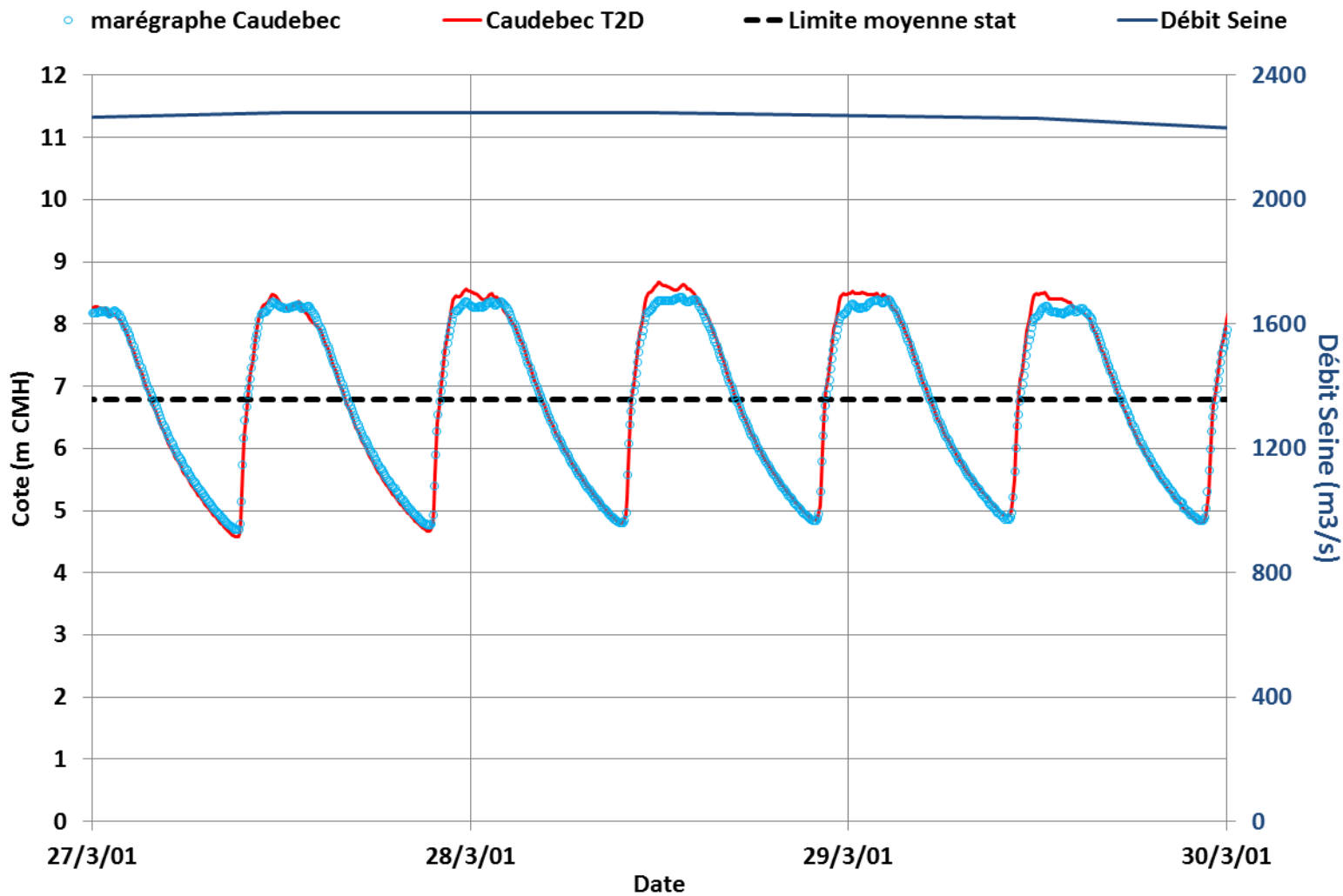
Événement de 2001 : Aizier



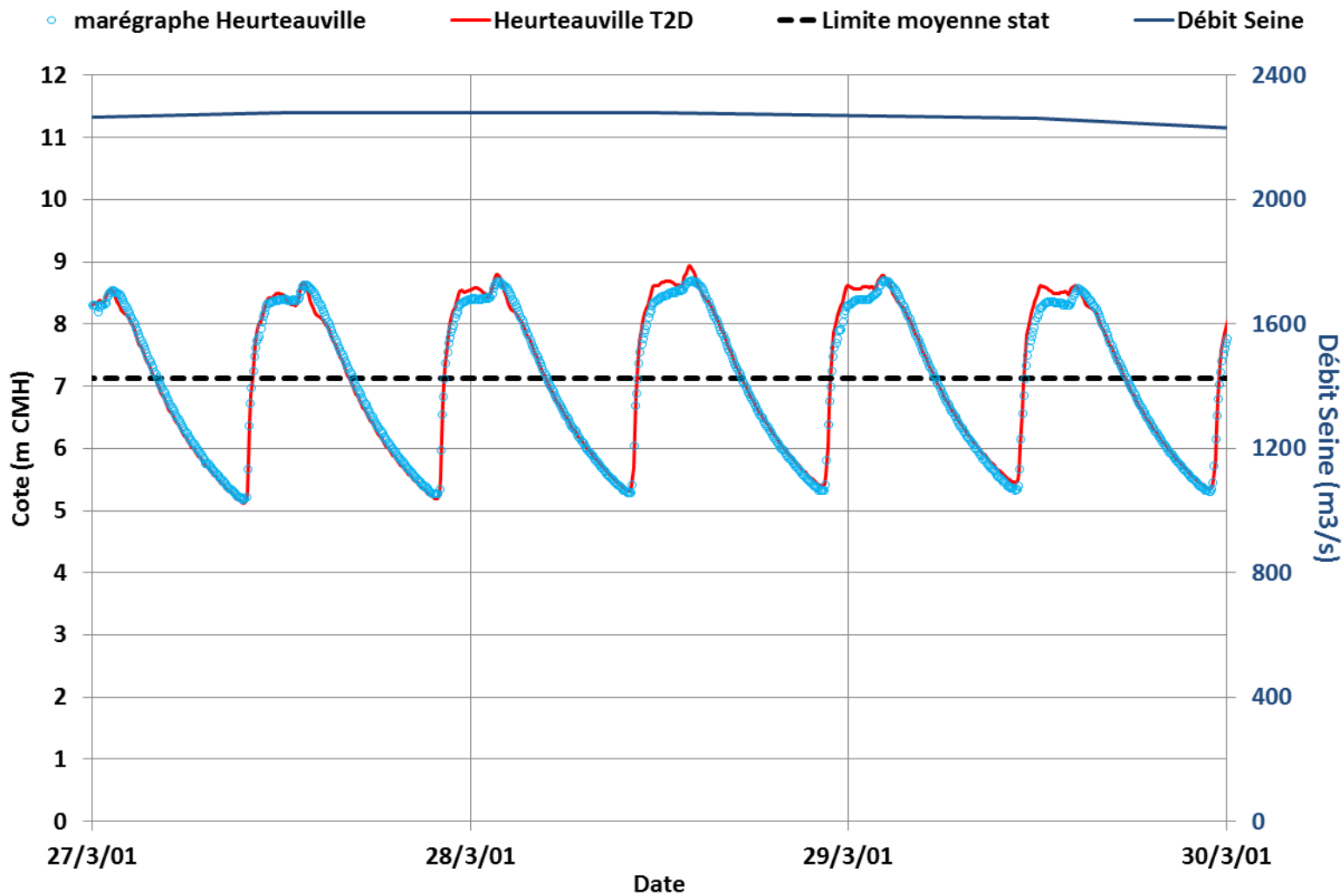
Événement de 2001 : Vatteville



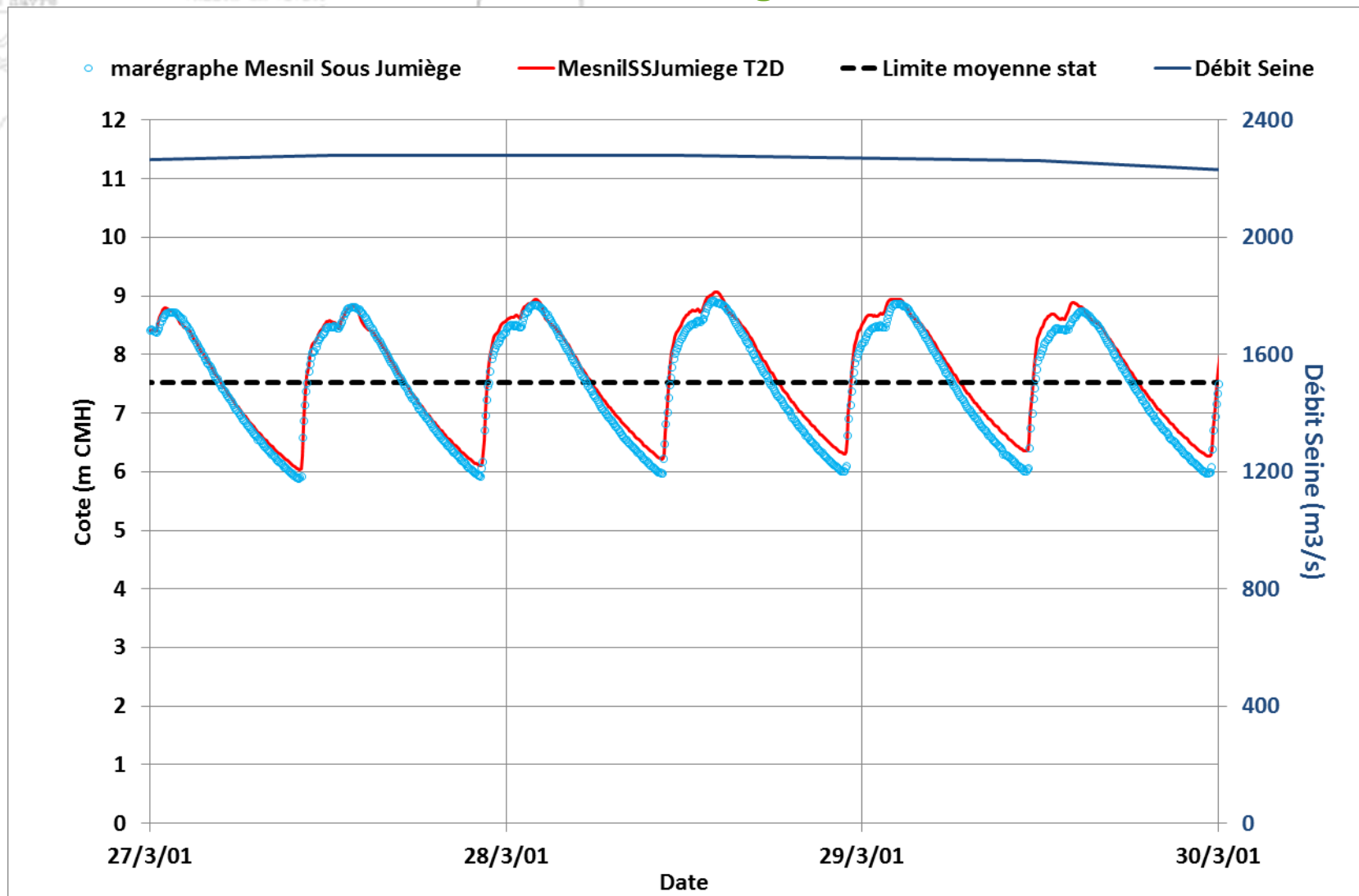
Événement de 2001 : Caudebec



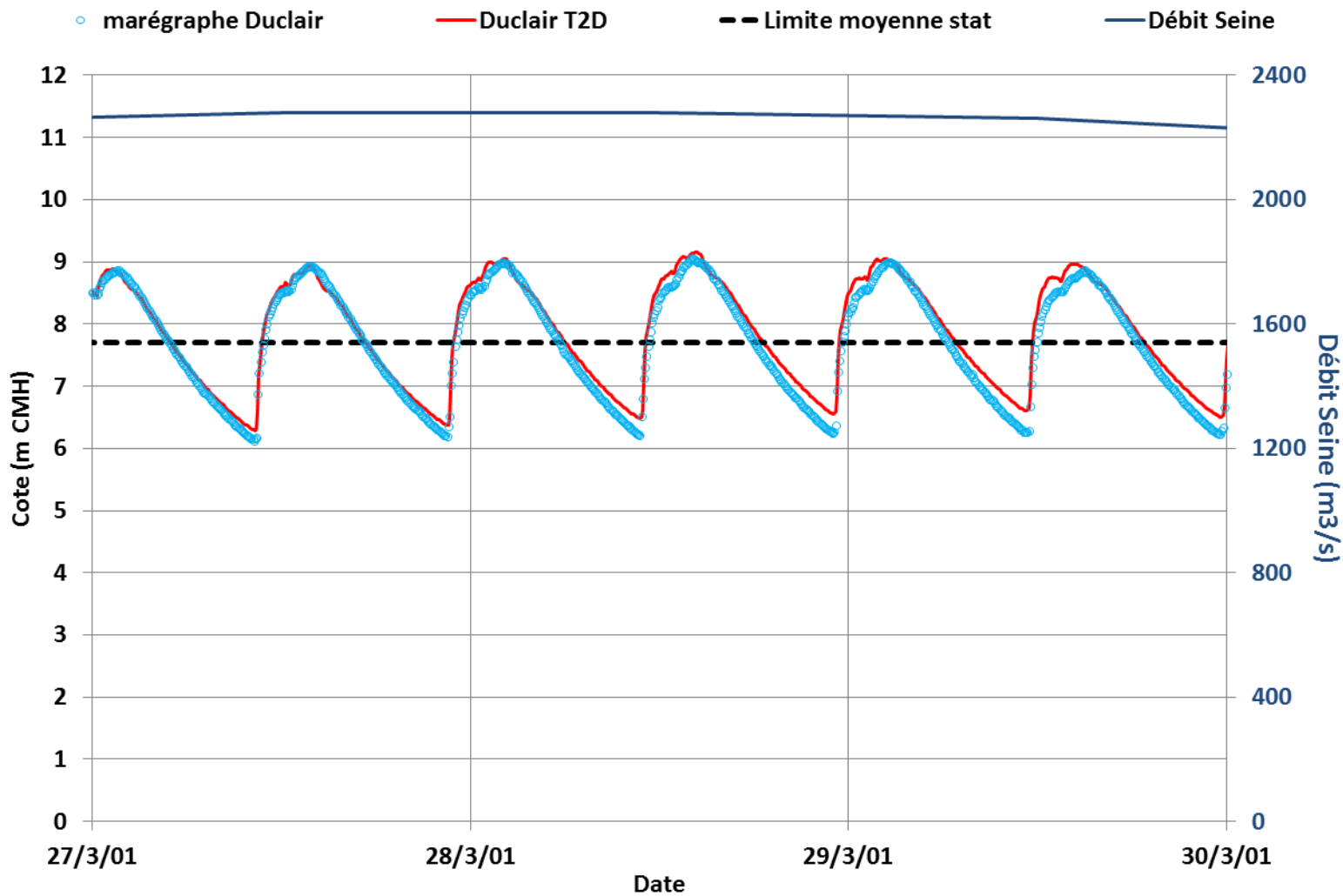
Événement de 2001 : Heurteauville



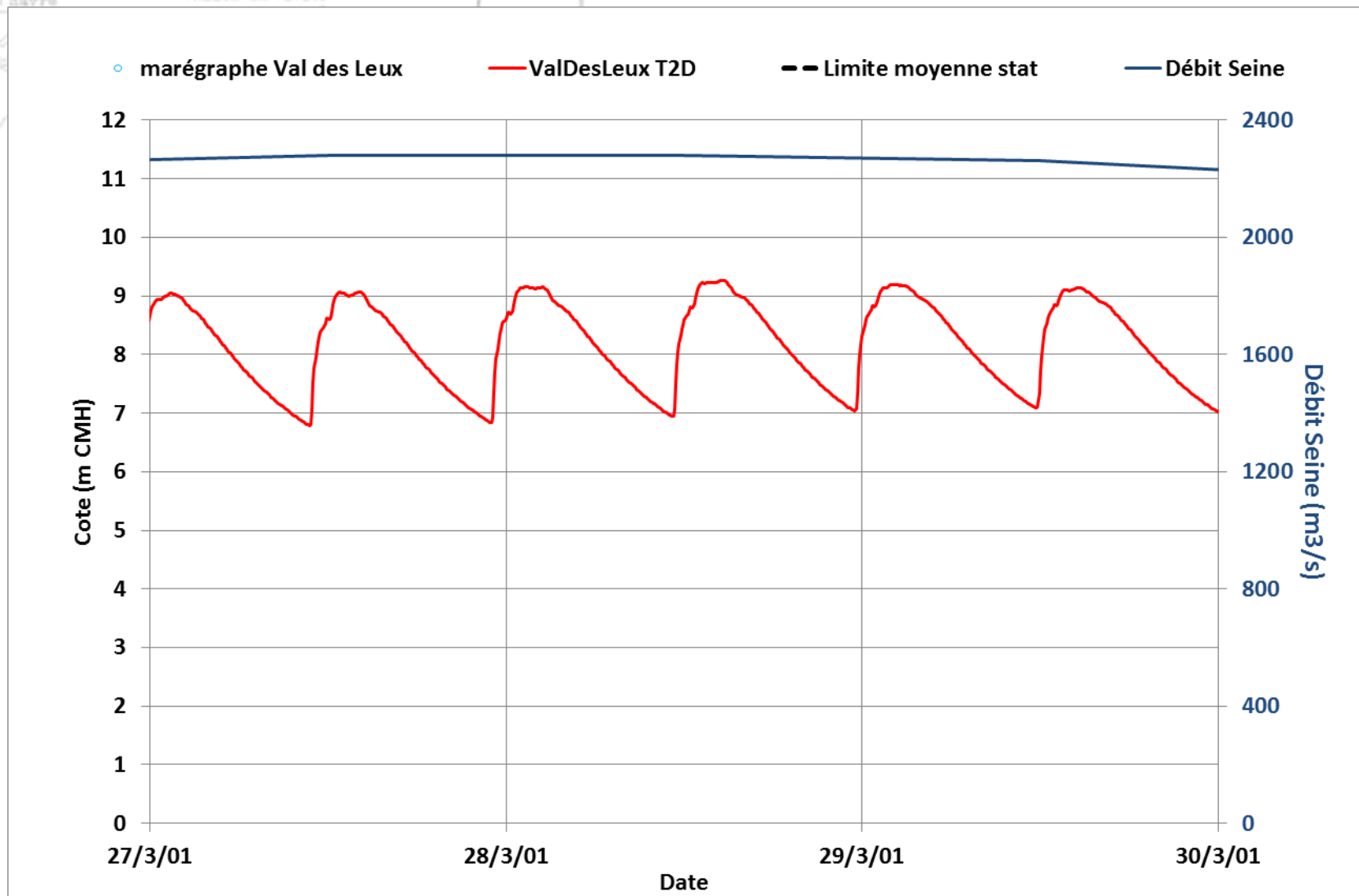
Événement de 2001 : Mesnil-sous-Jumièges



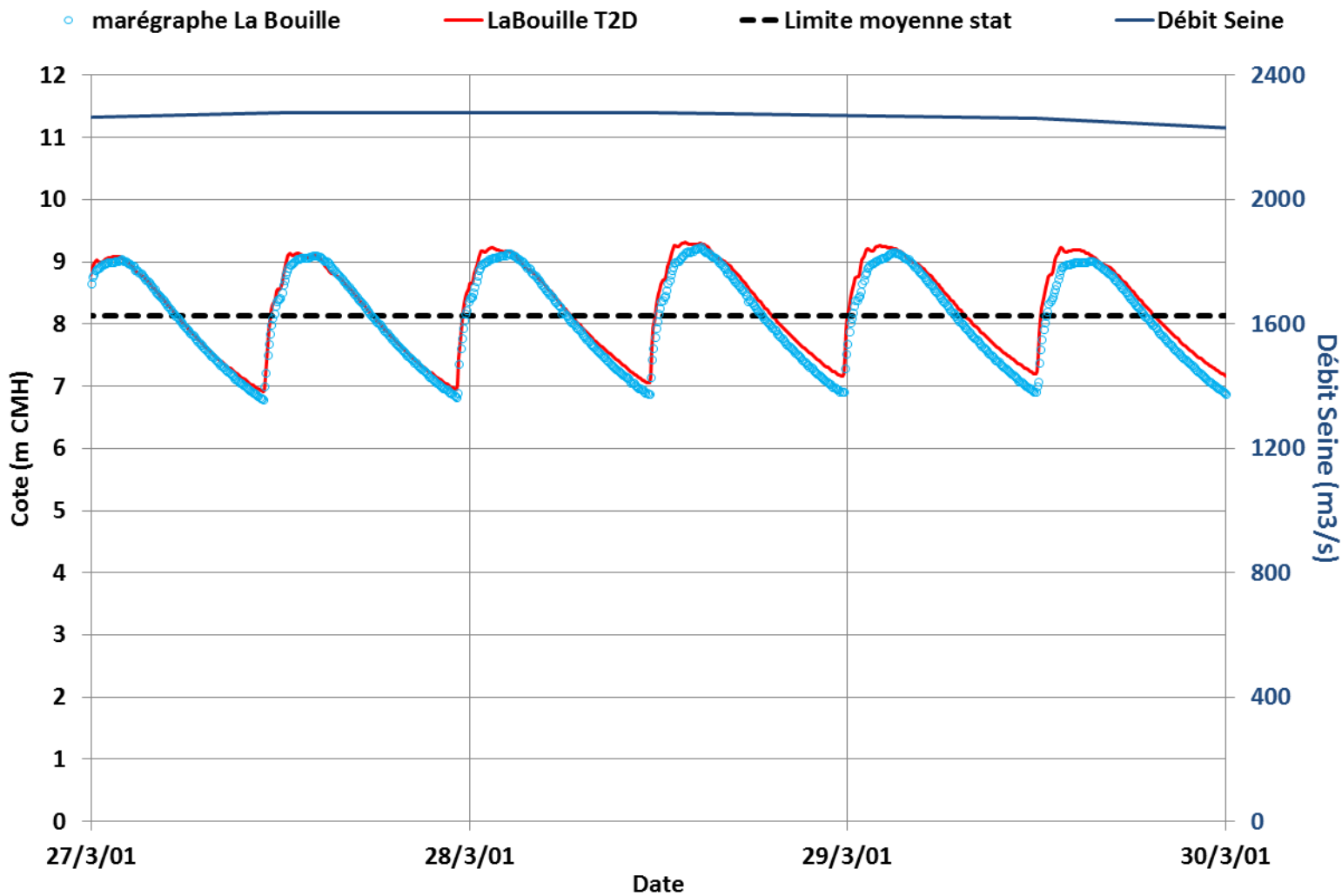
Événement de 2001 : Duclair



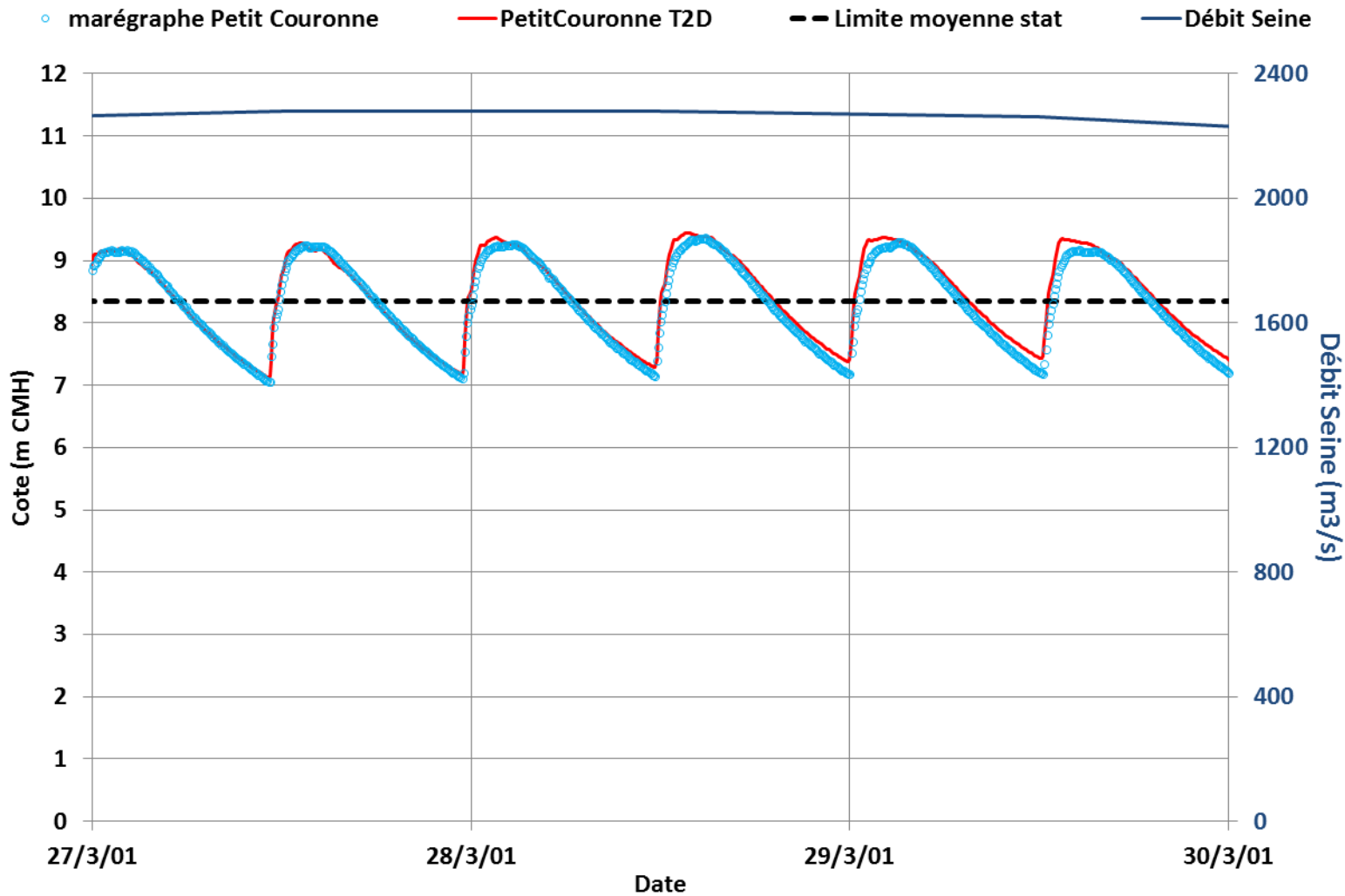
Événement de 2001 : Val-des-Leux



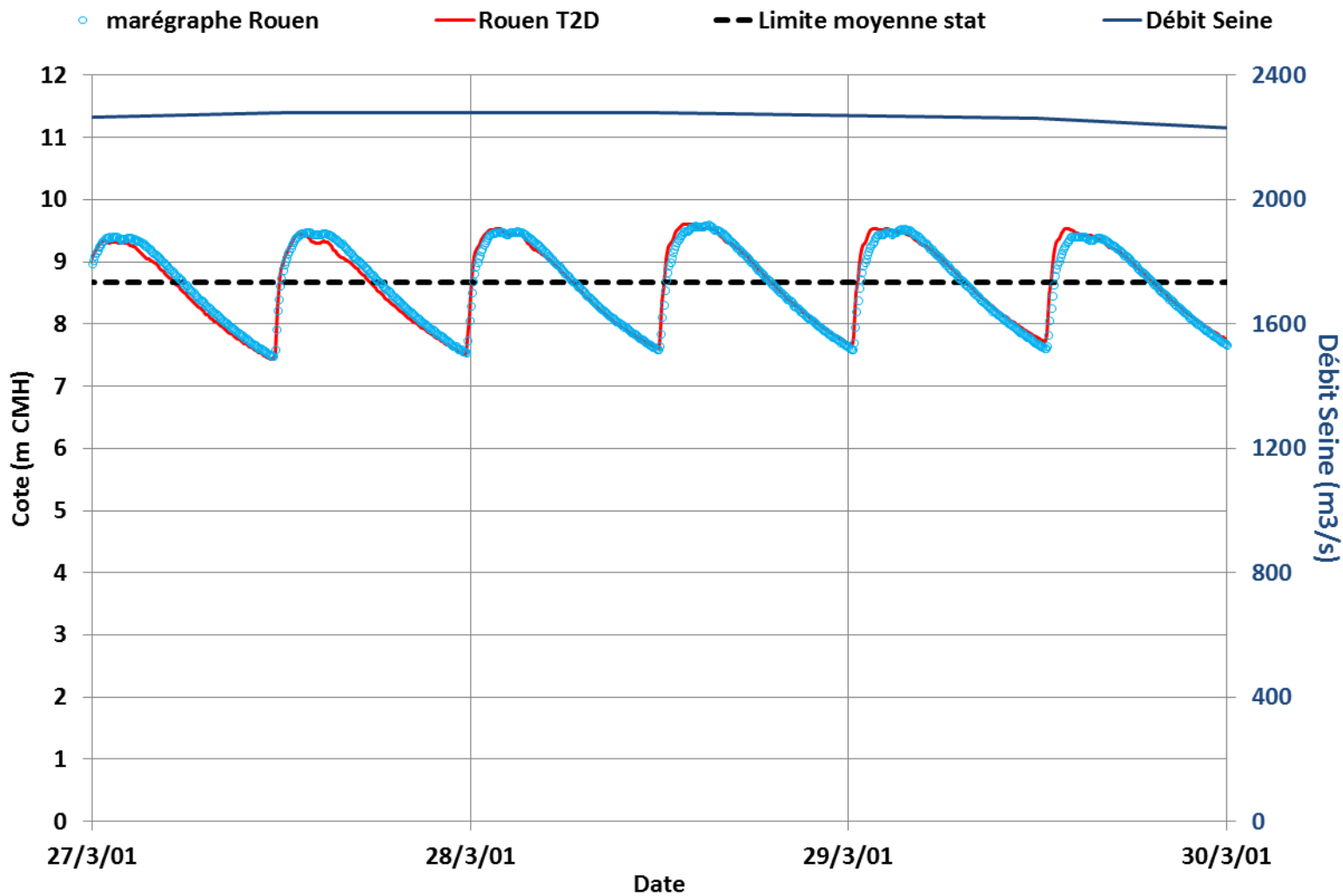
Événement de 2001 : La Bouille



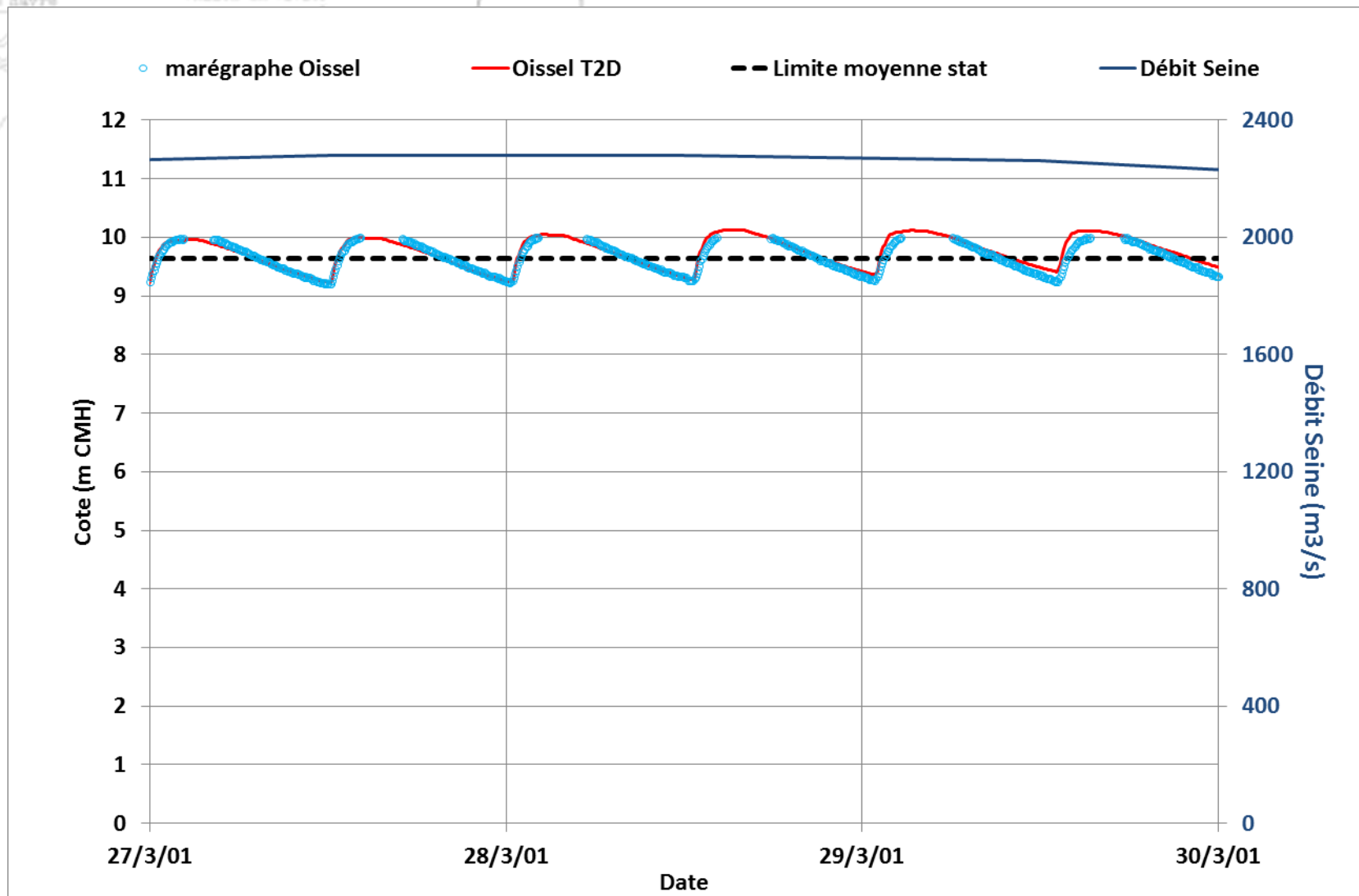
Événement de 2001 : Petit Couronne



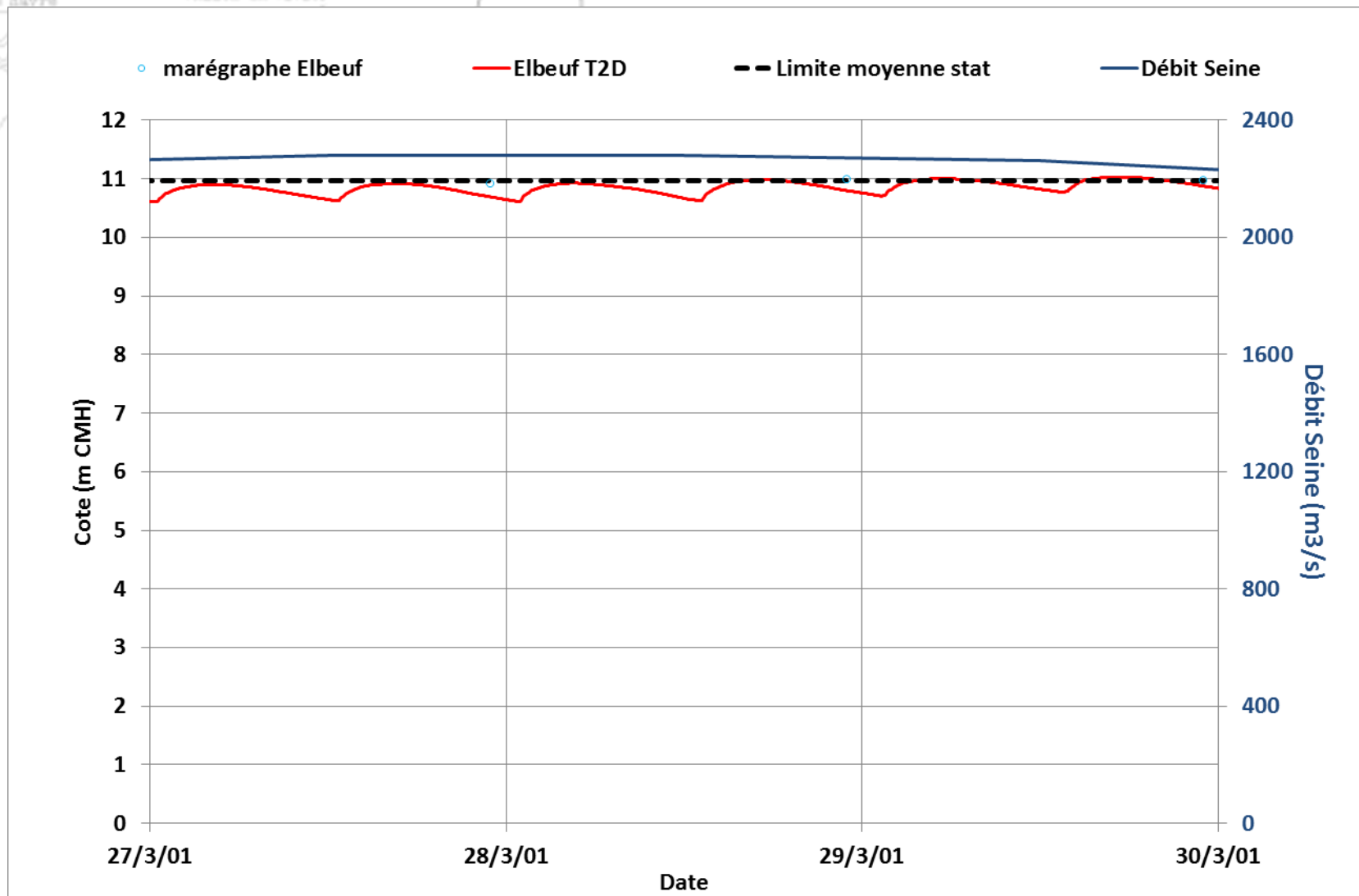
Événement de 2001 : Rouen



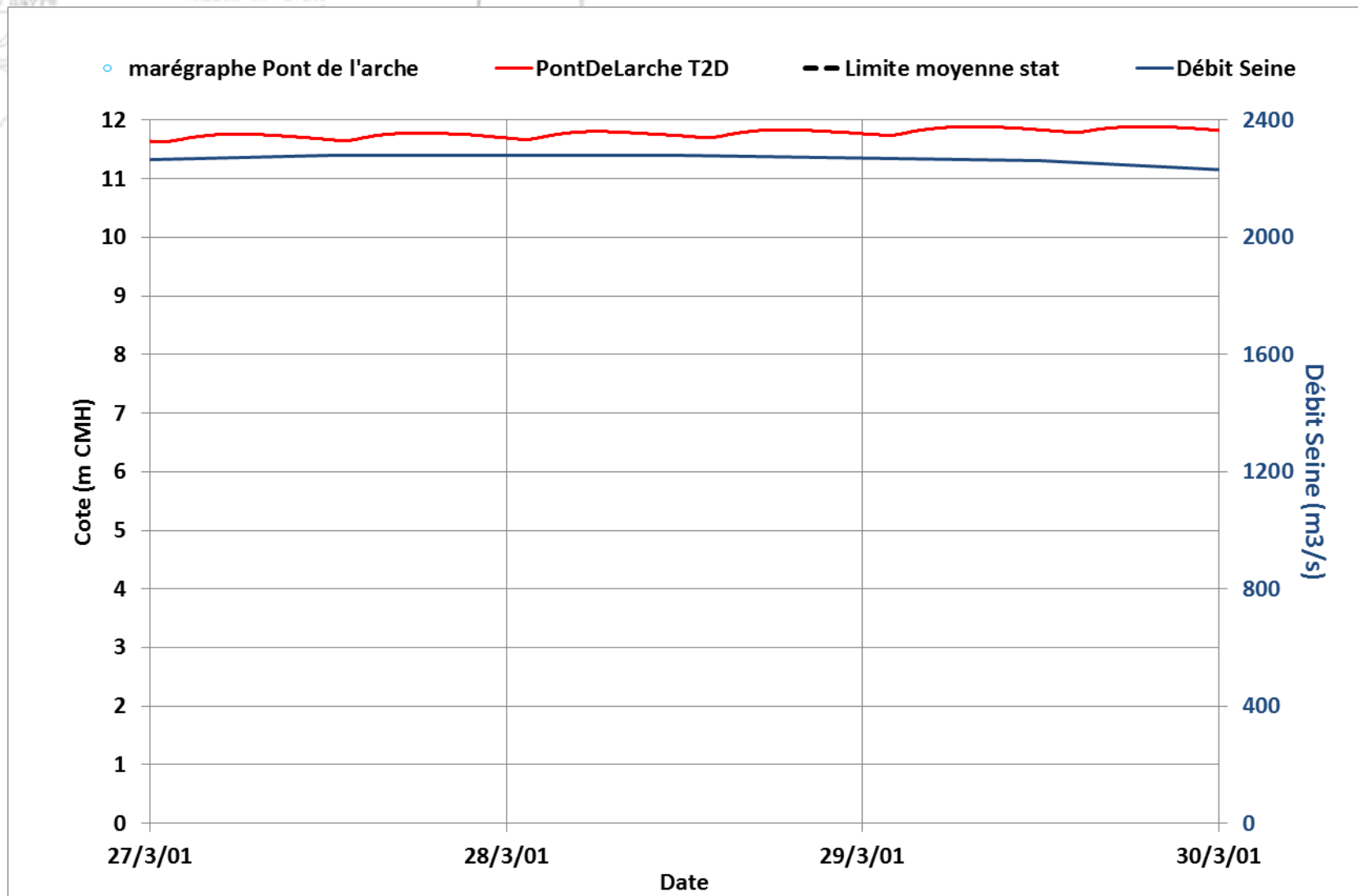
Événement de 2001 : Oissel



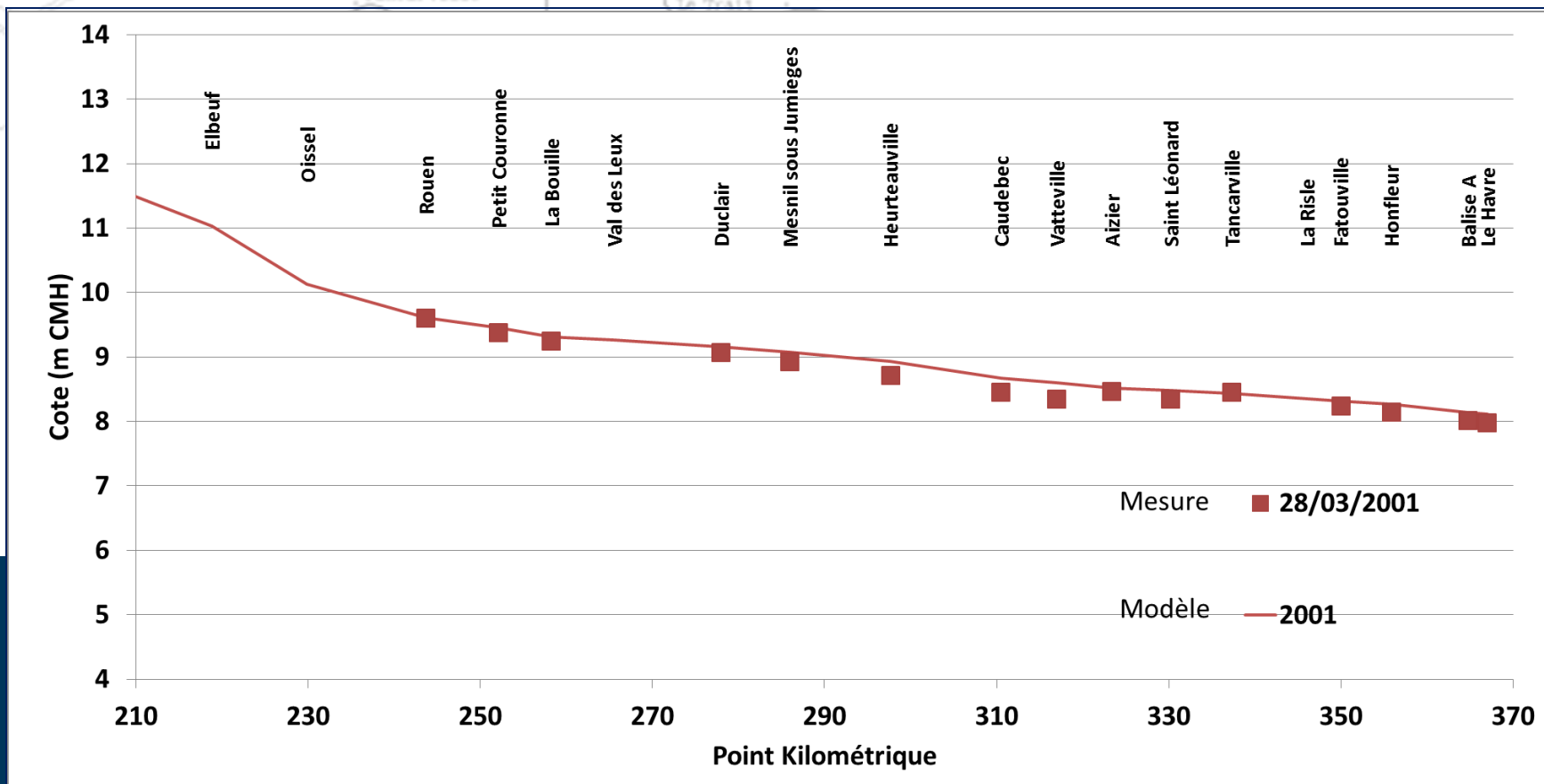
Événement de 2001 : Elbeuf



Événement de 2001 : Pont-de-l'Arche



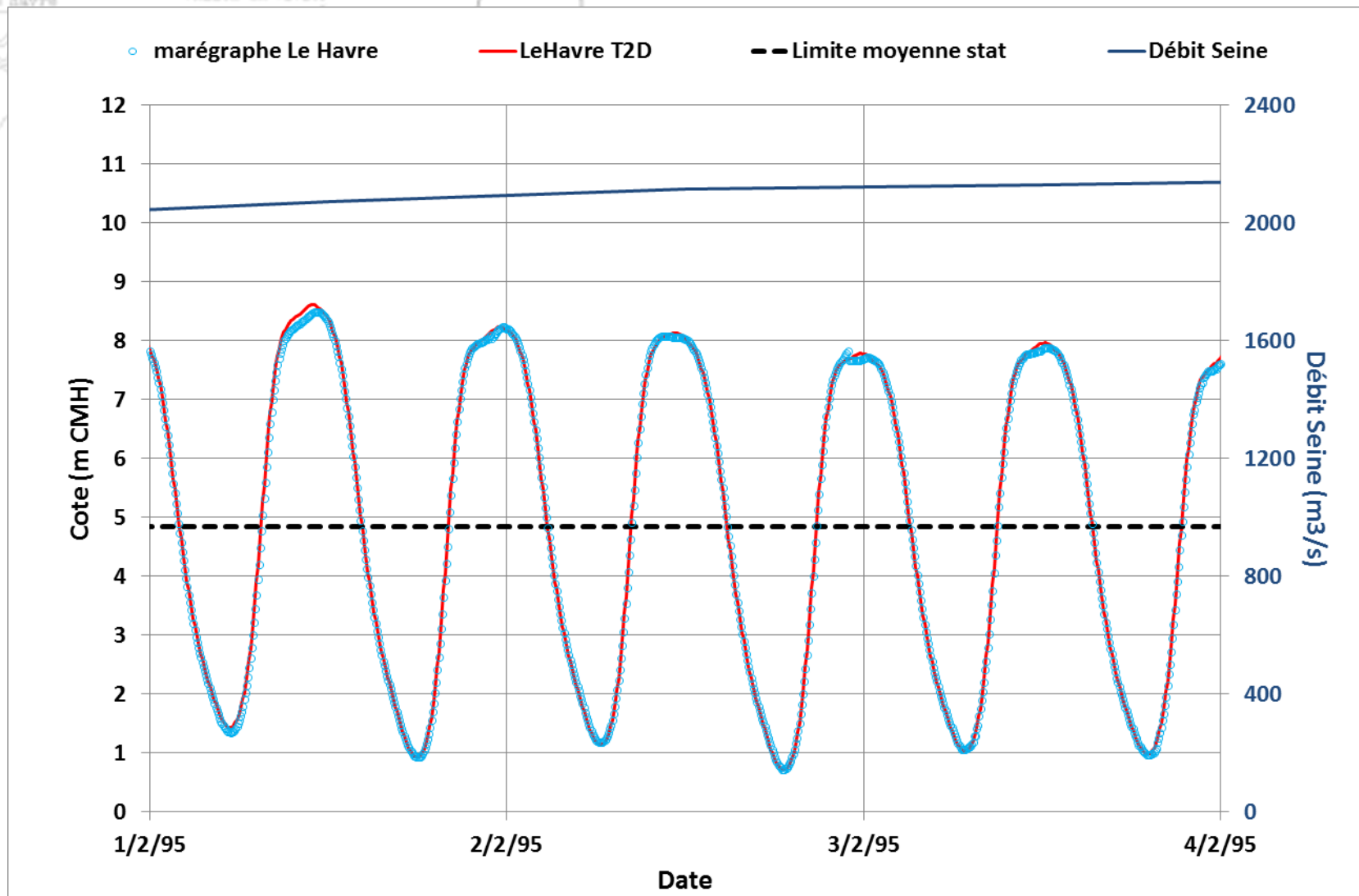
Événement de 2001



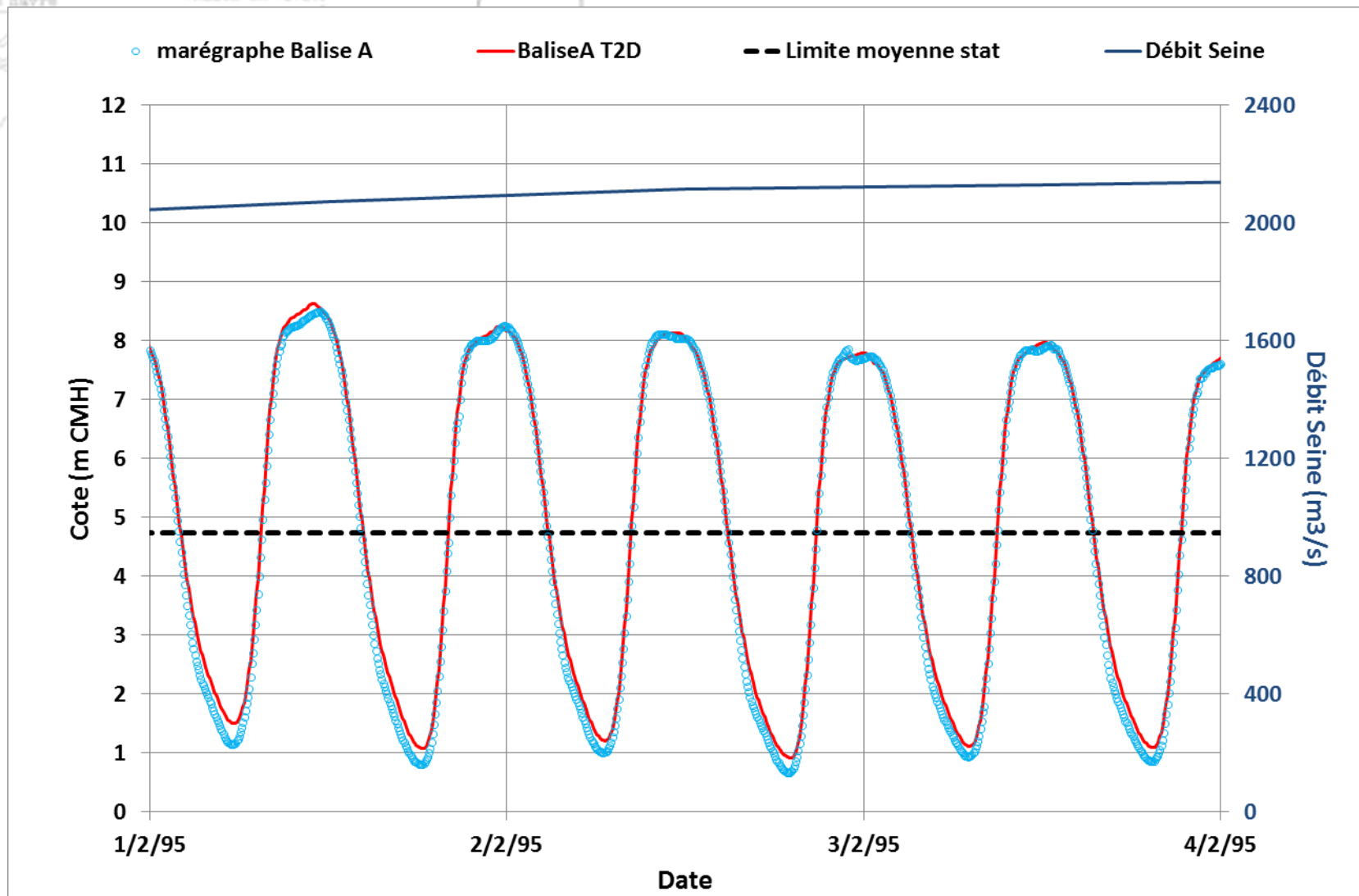


Simulation de crue 1995

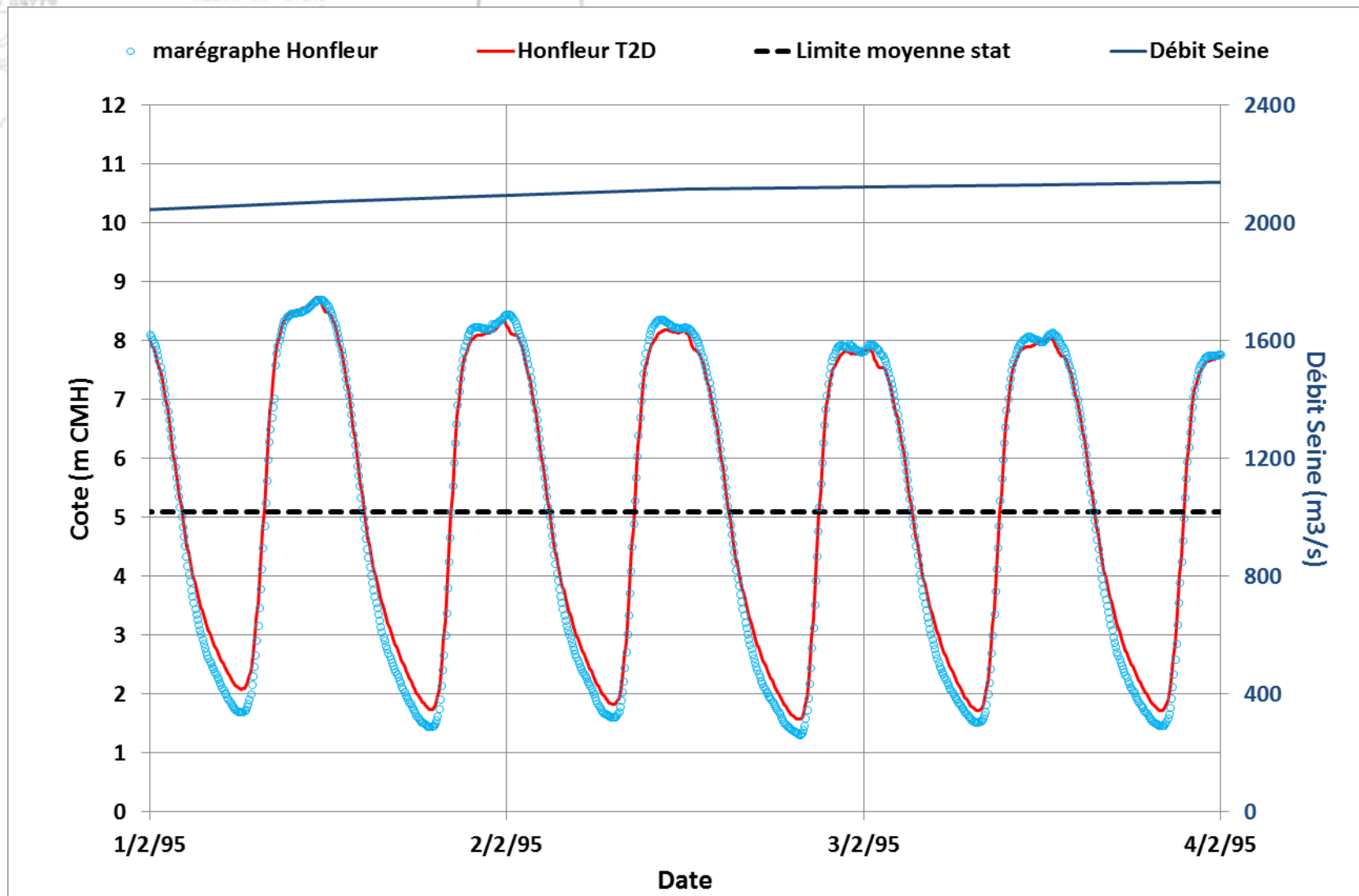
Événement de 1995 : Le Havre



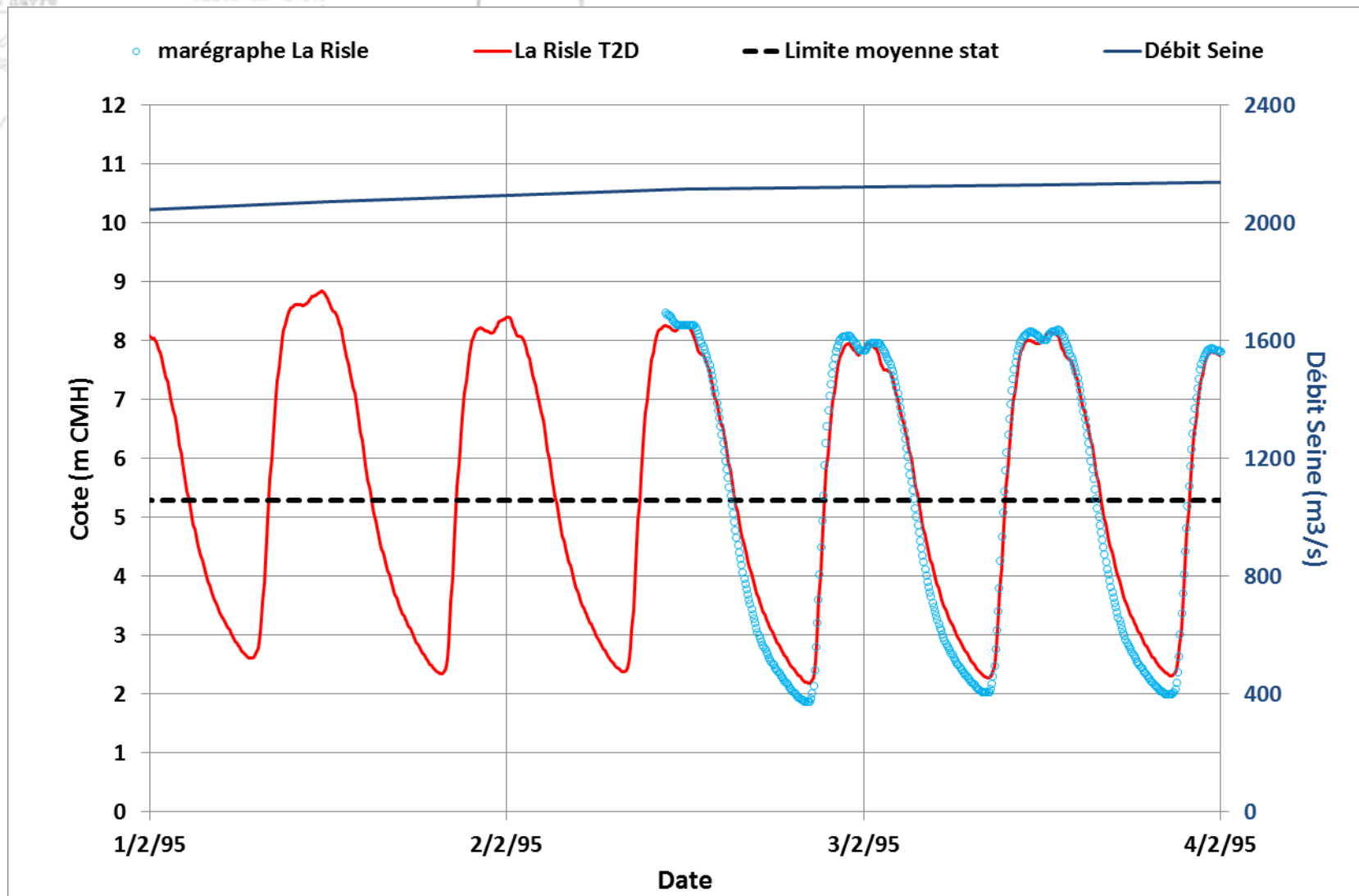
Événement de 1995 : Balise A



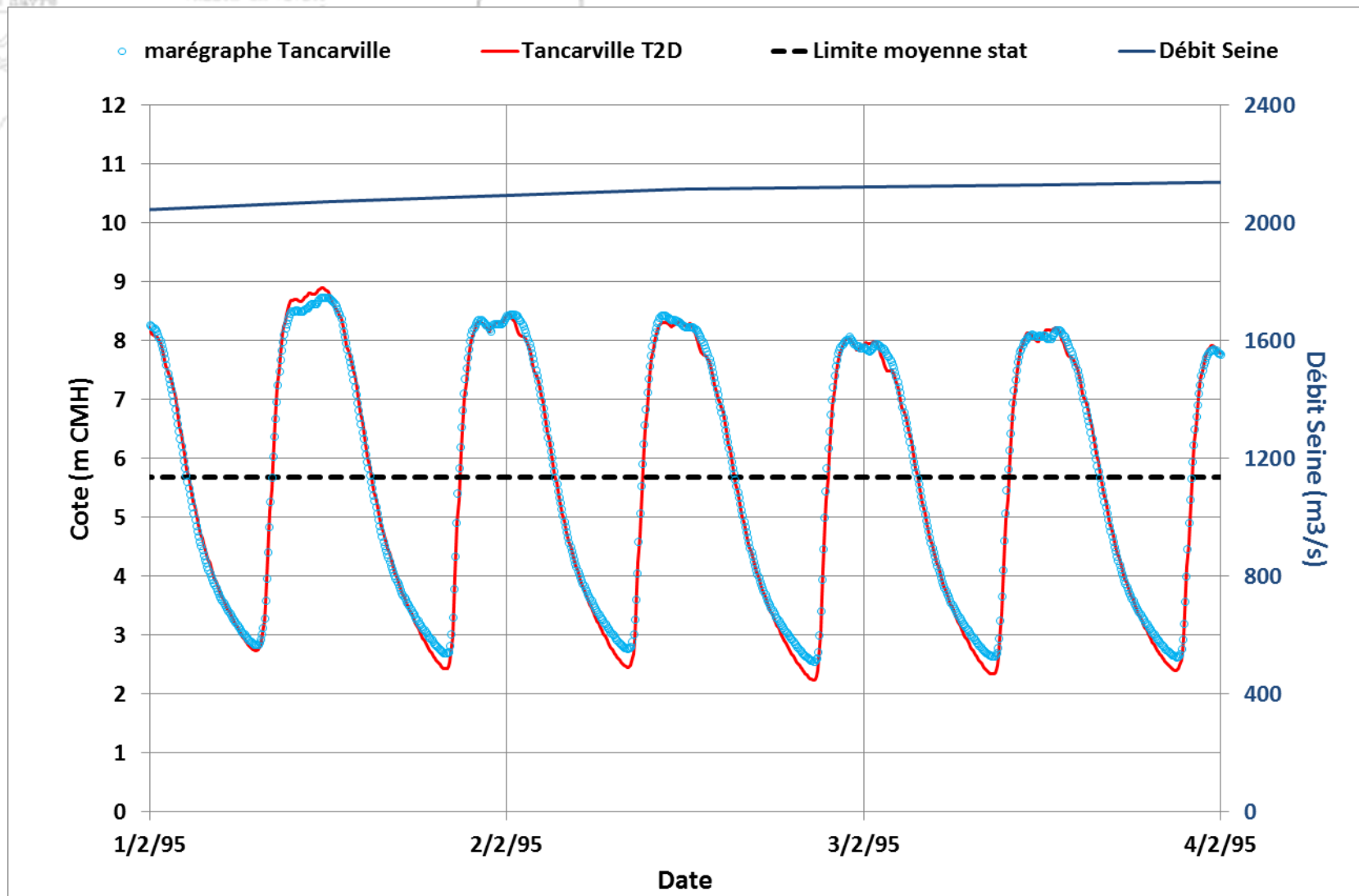
Événement de 1995 : Honfleur



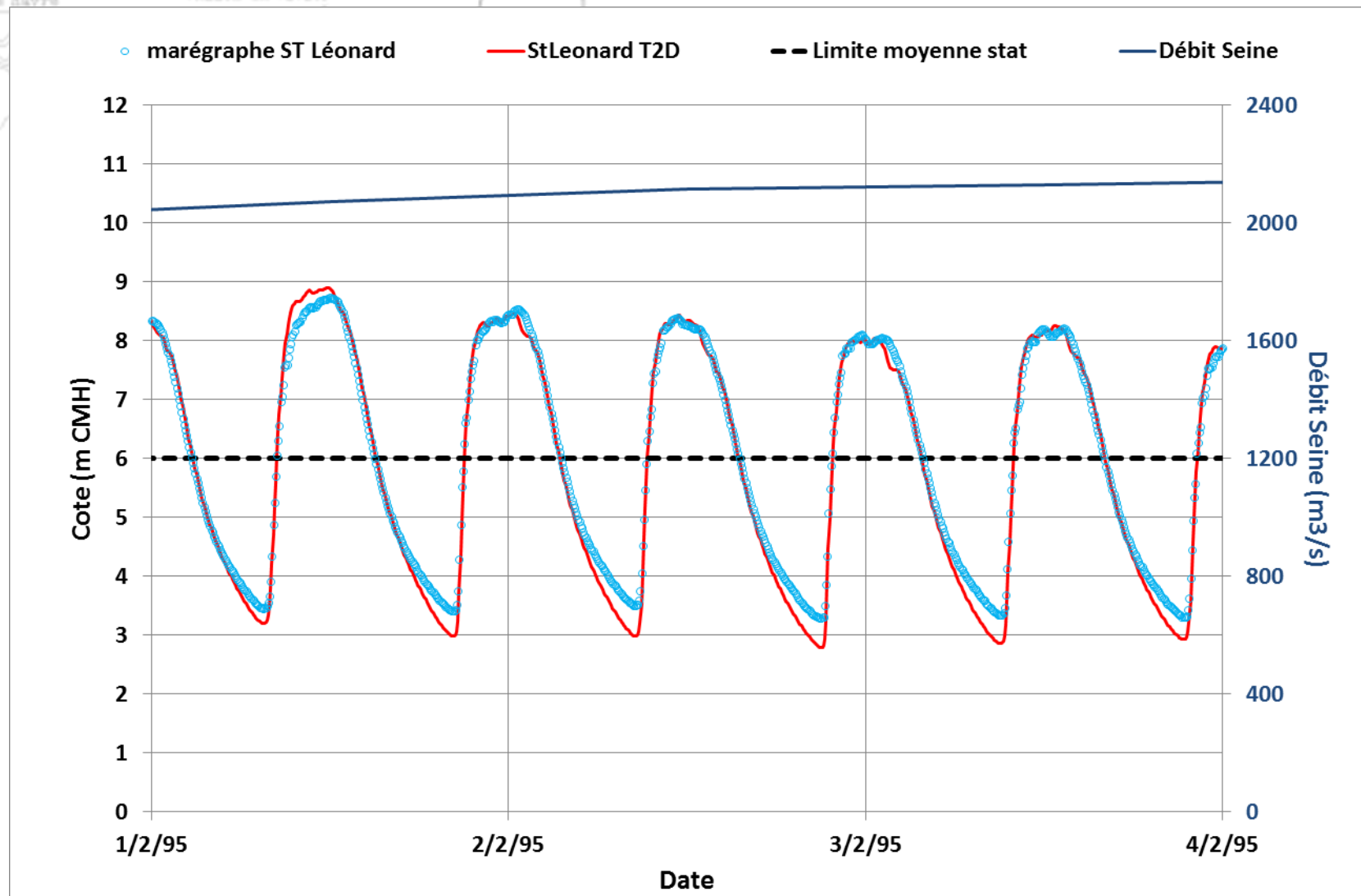
Événement de 1995 : La Risle



Événement de 1995 : Tancarville

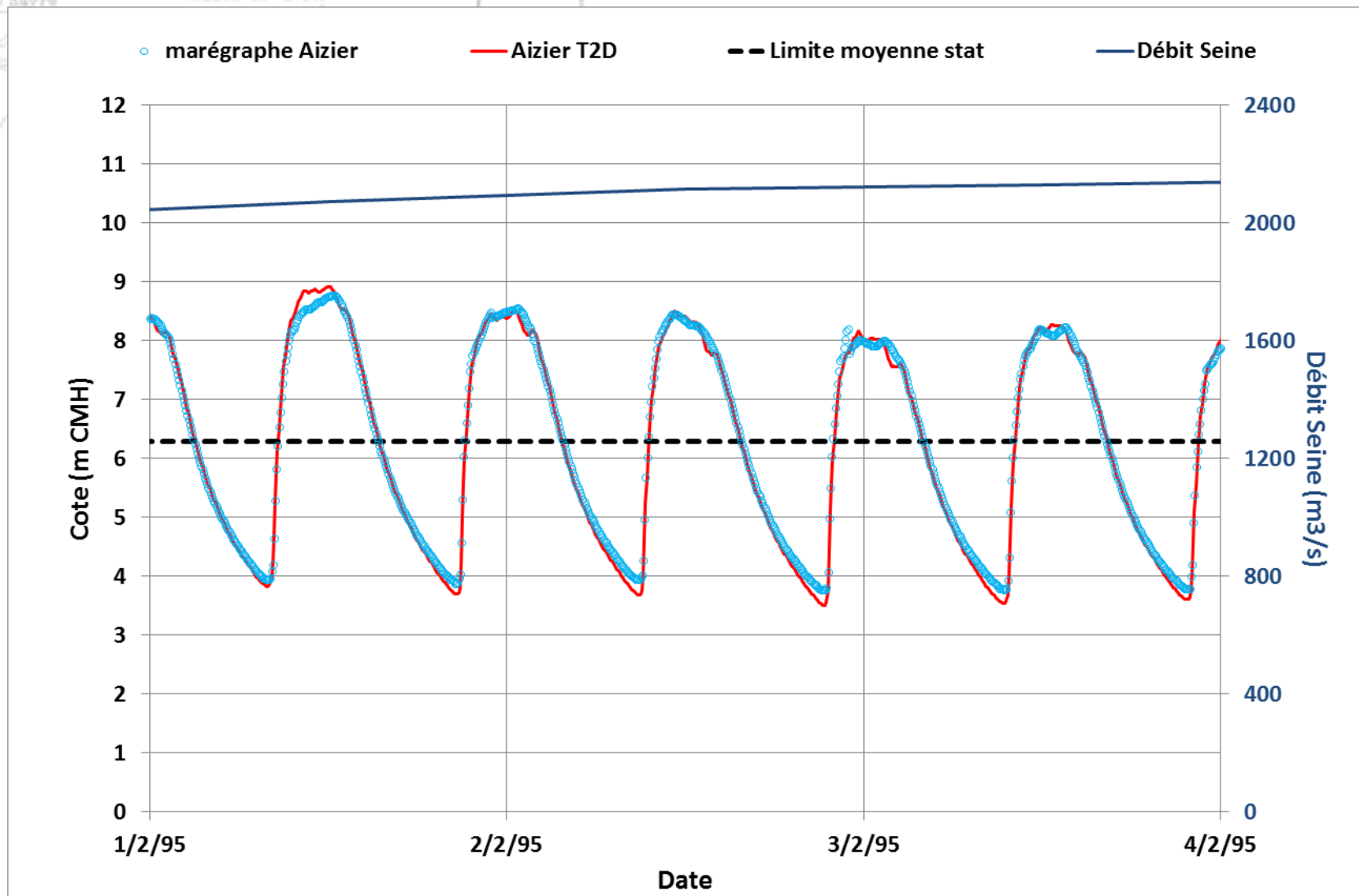


Événement de 1995 : St Léonard

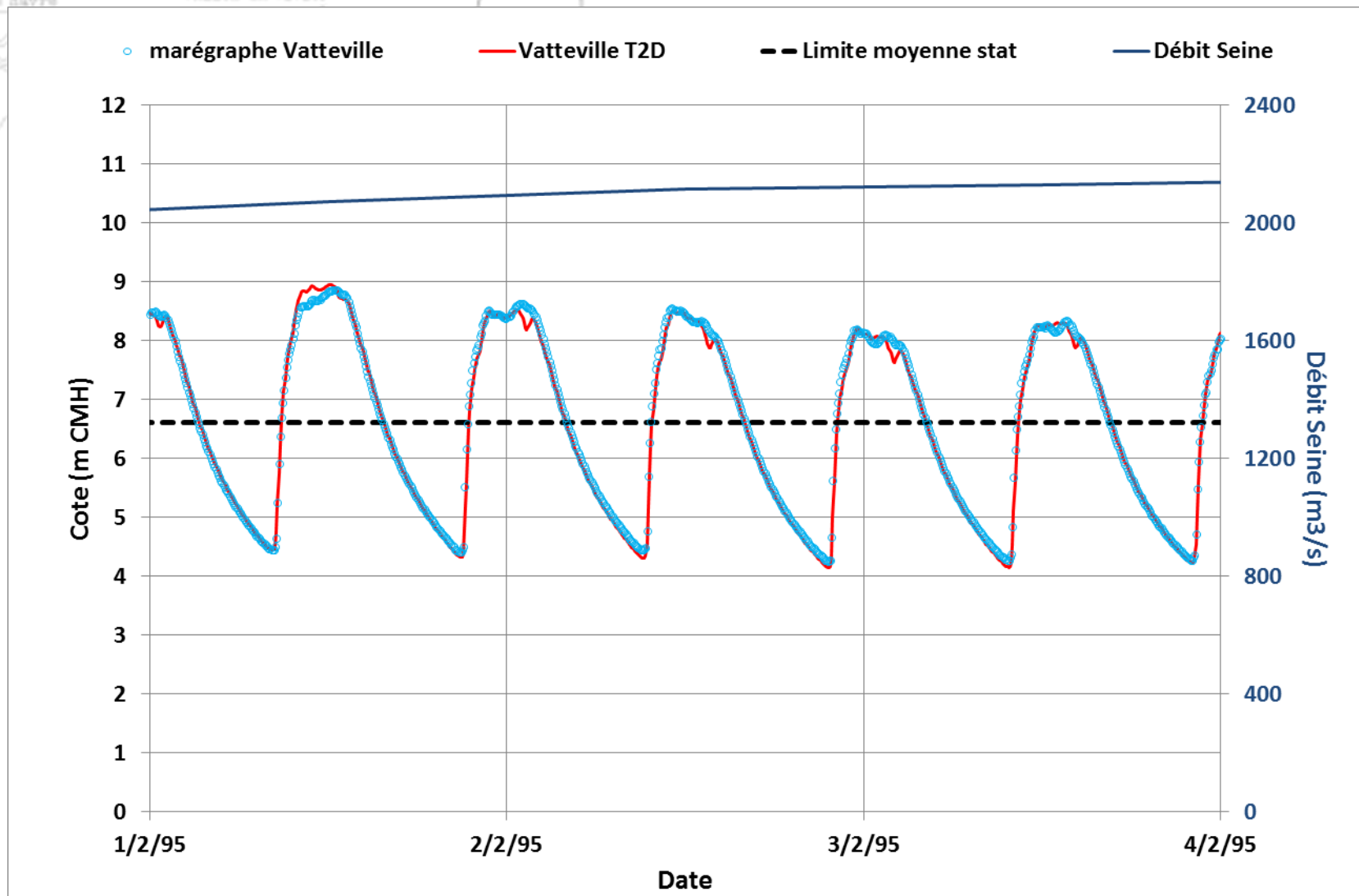


D – Figure 103

Événement de 1995 : Aizier

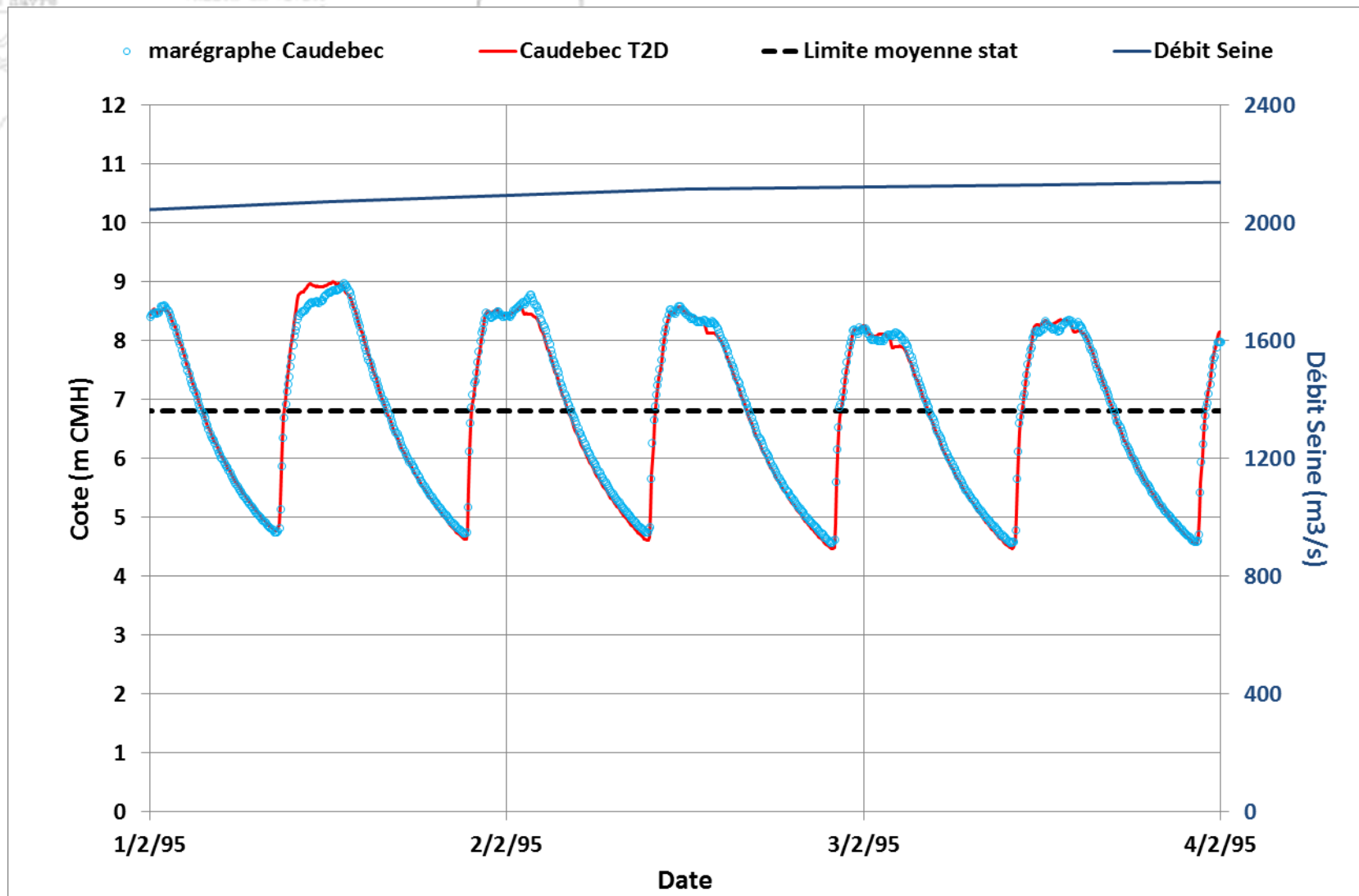


Événement de 1995 : Vatteville

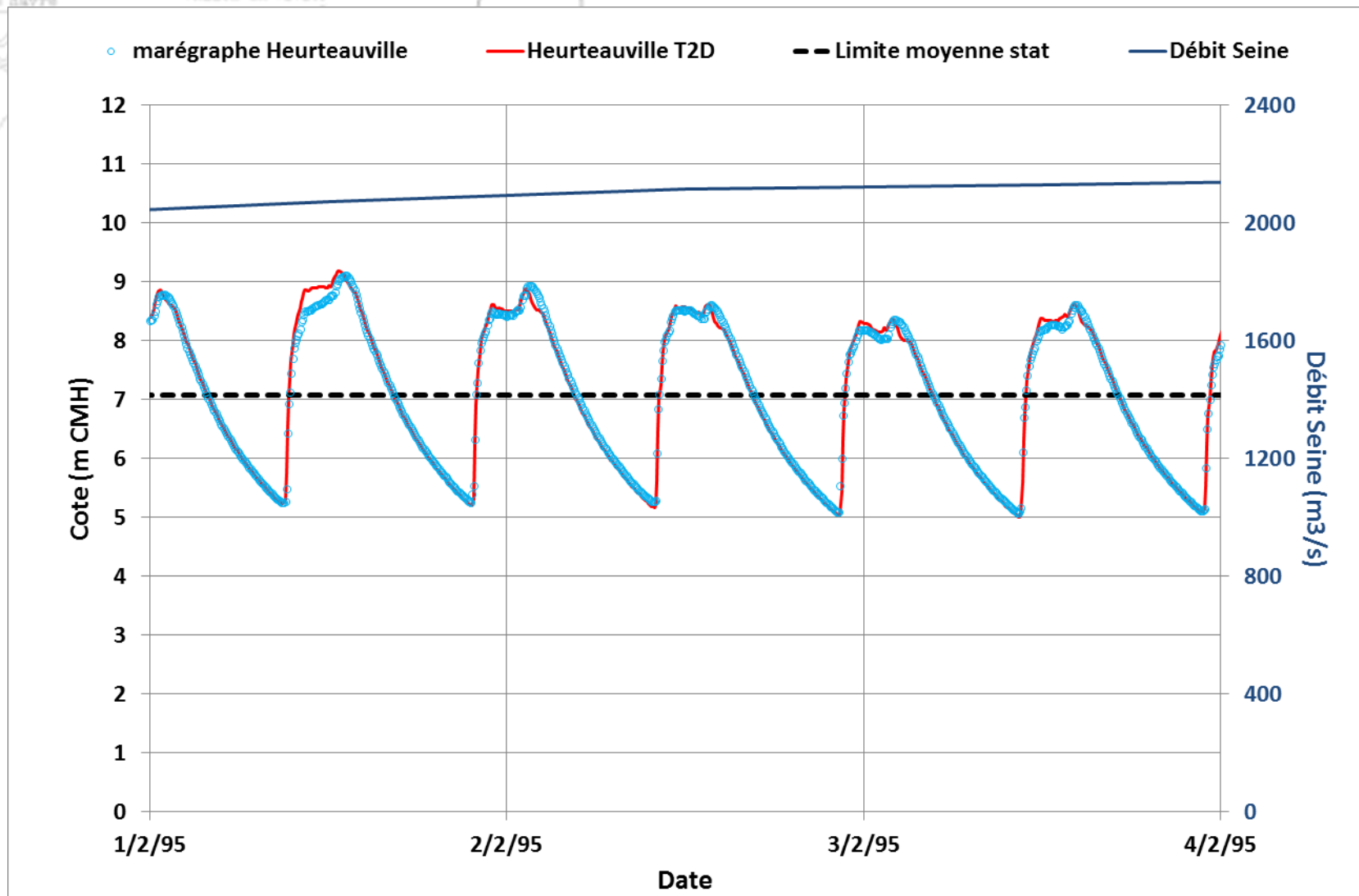


D – Figure 105

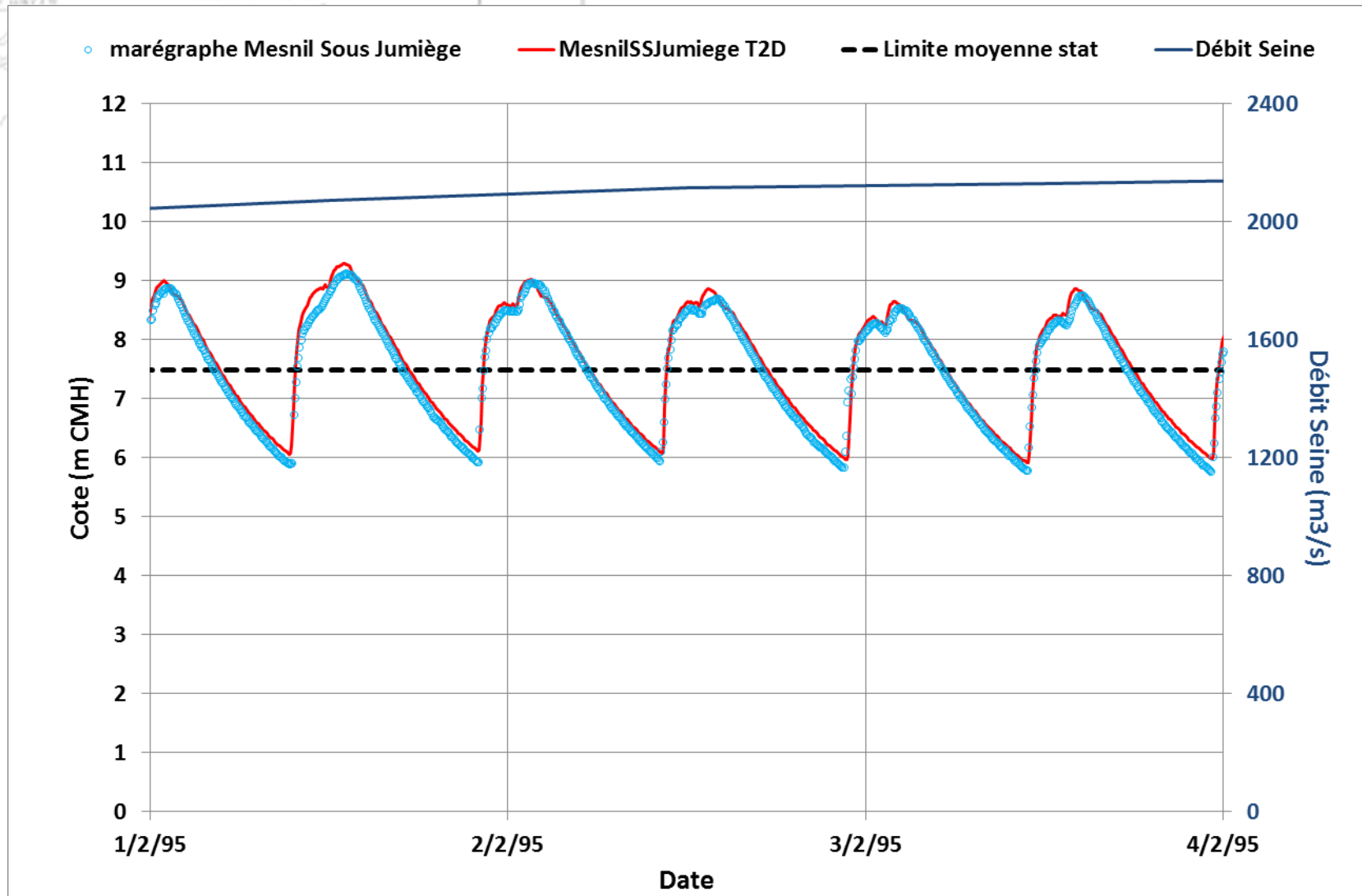
Événement de 1995 : Caudebec



Événement de 1995 : Heurteauville

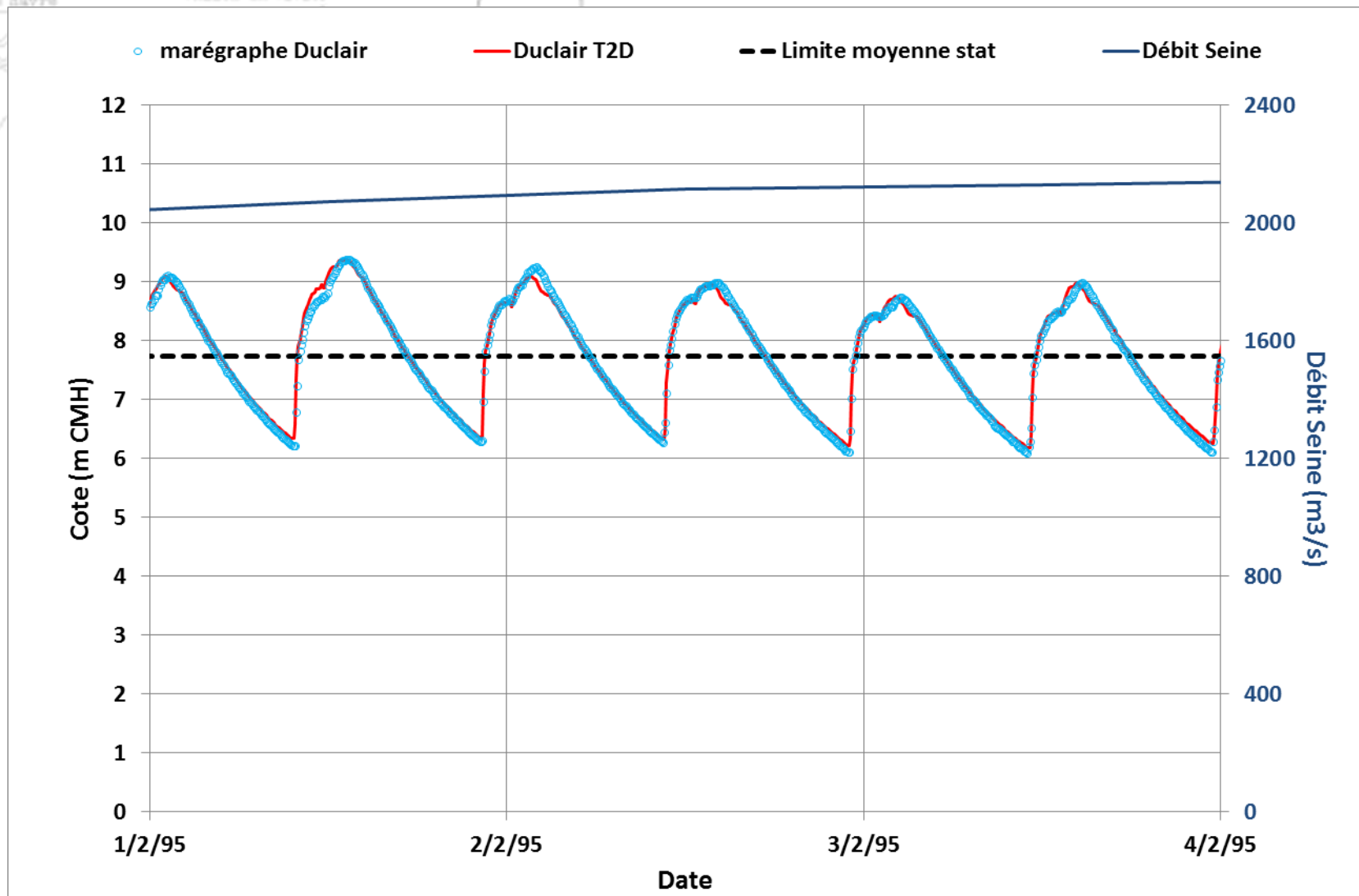


Événement de 1995 : Mesnil-sous-Jumièges

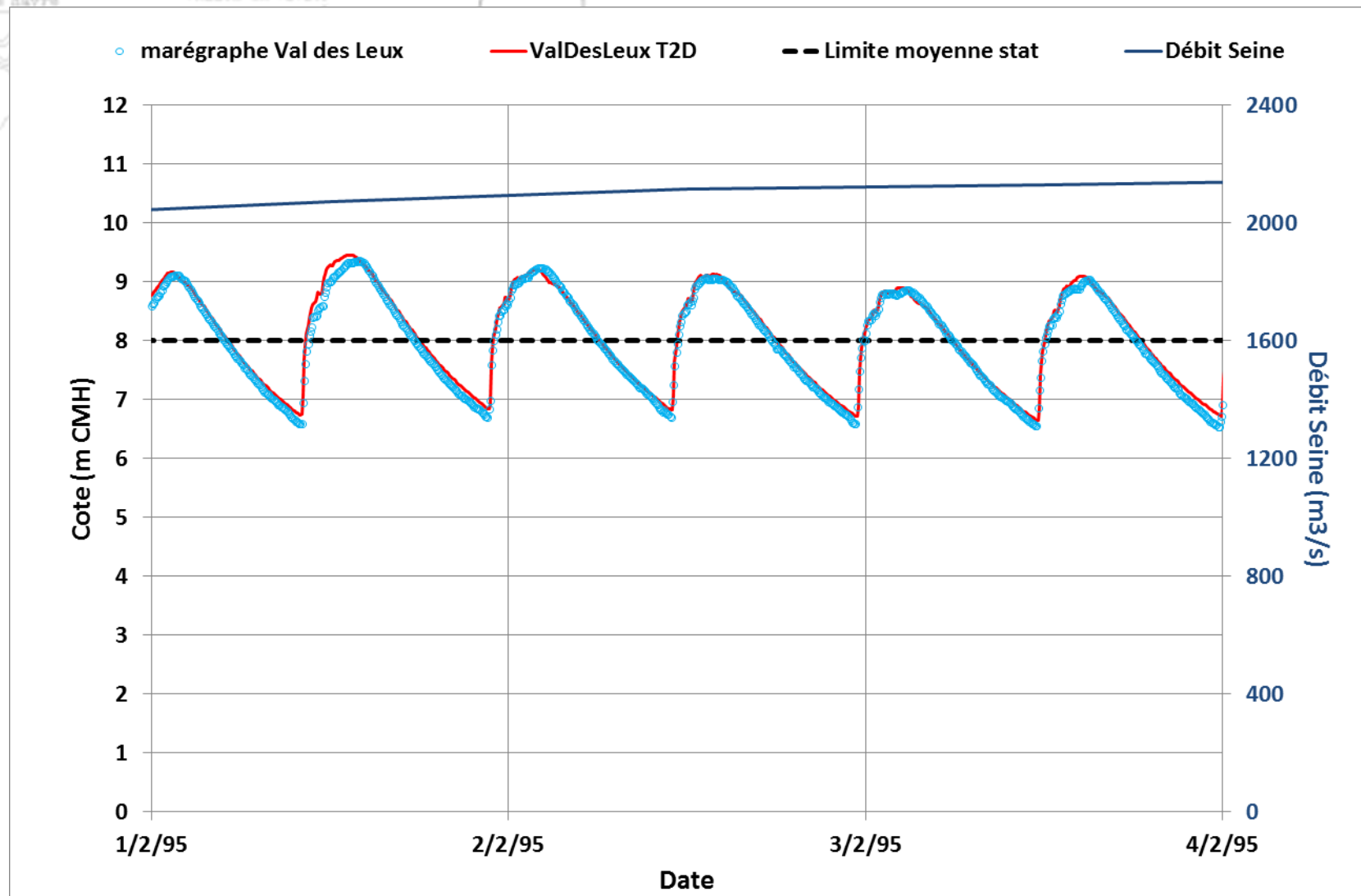


D – Figure 108

Événement de 1995 : Duclair

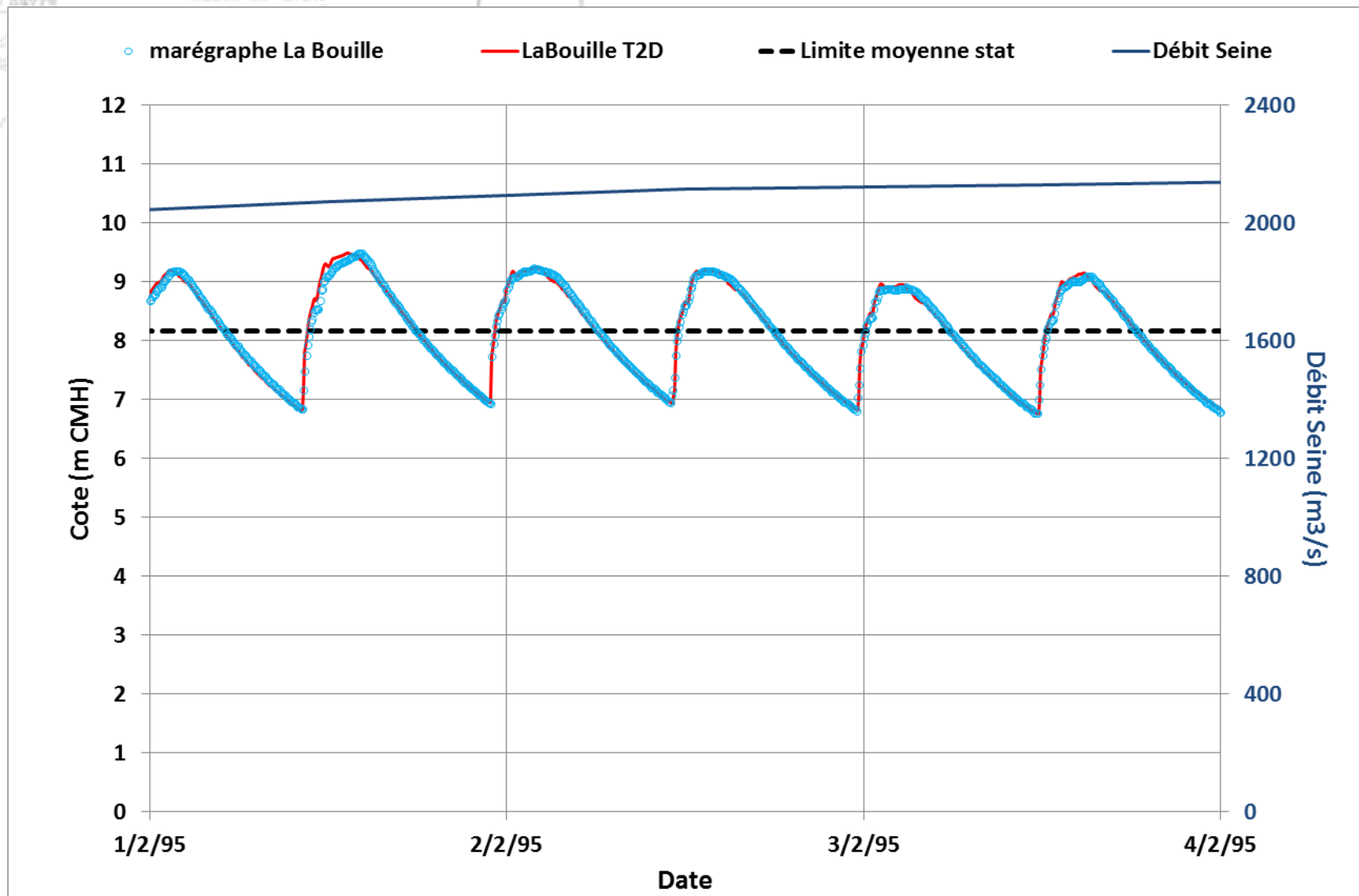


Événement de 1995 : Val-des-Leux

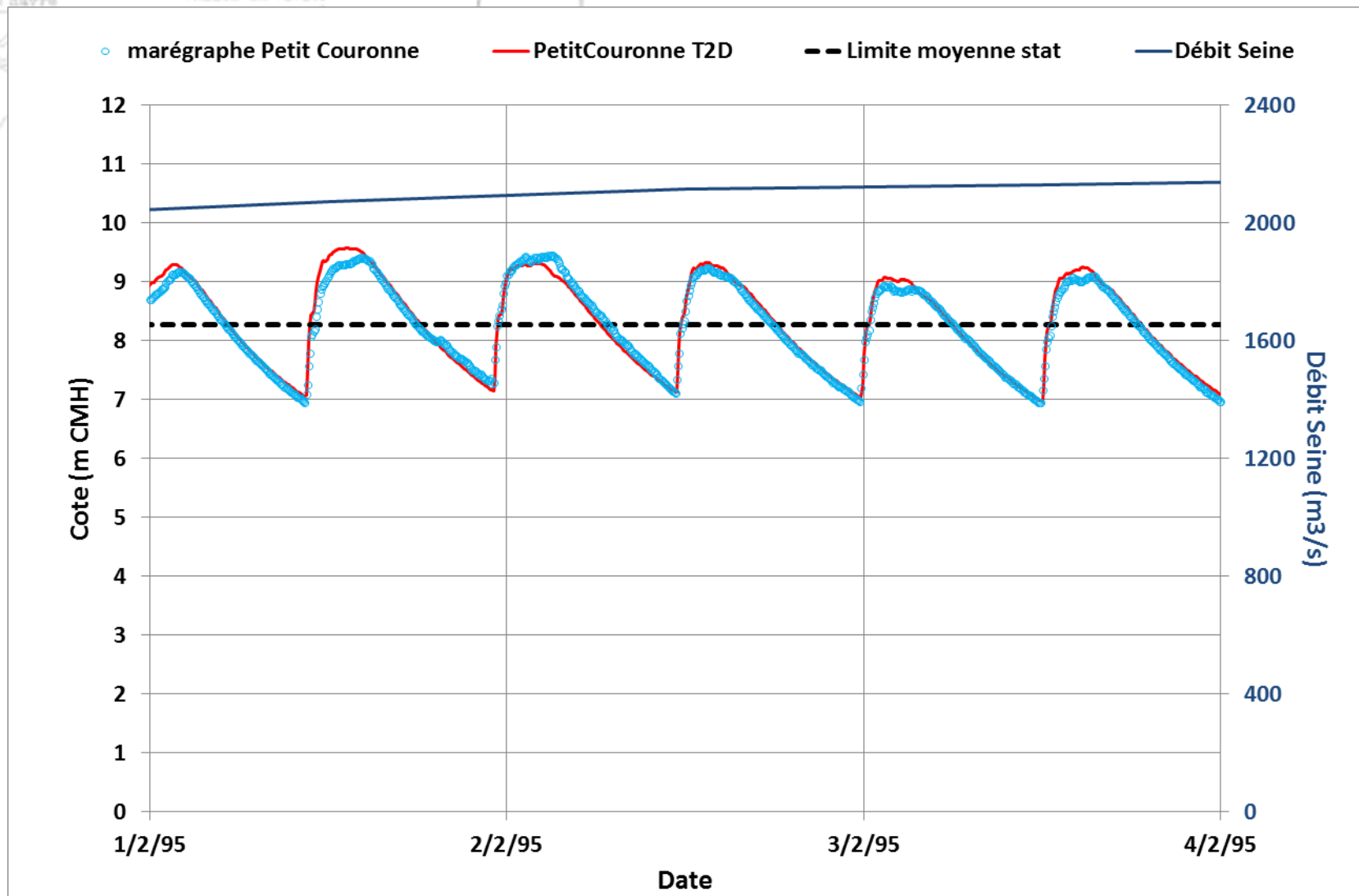


D – Figure 110

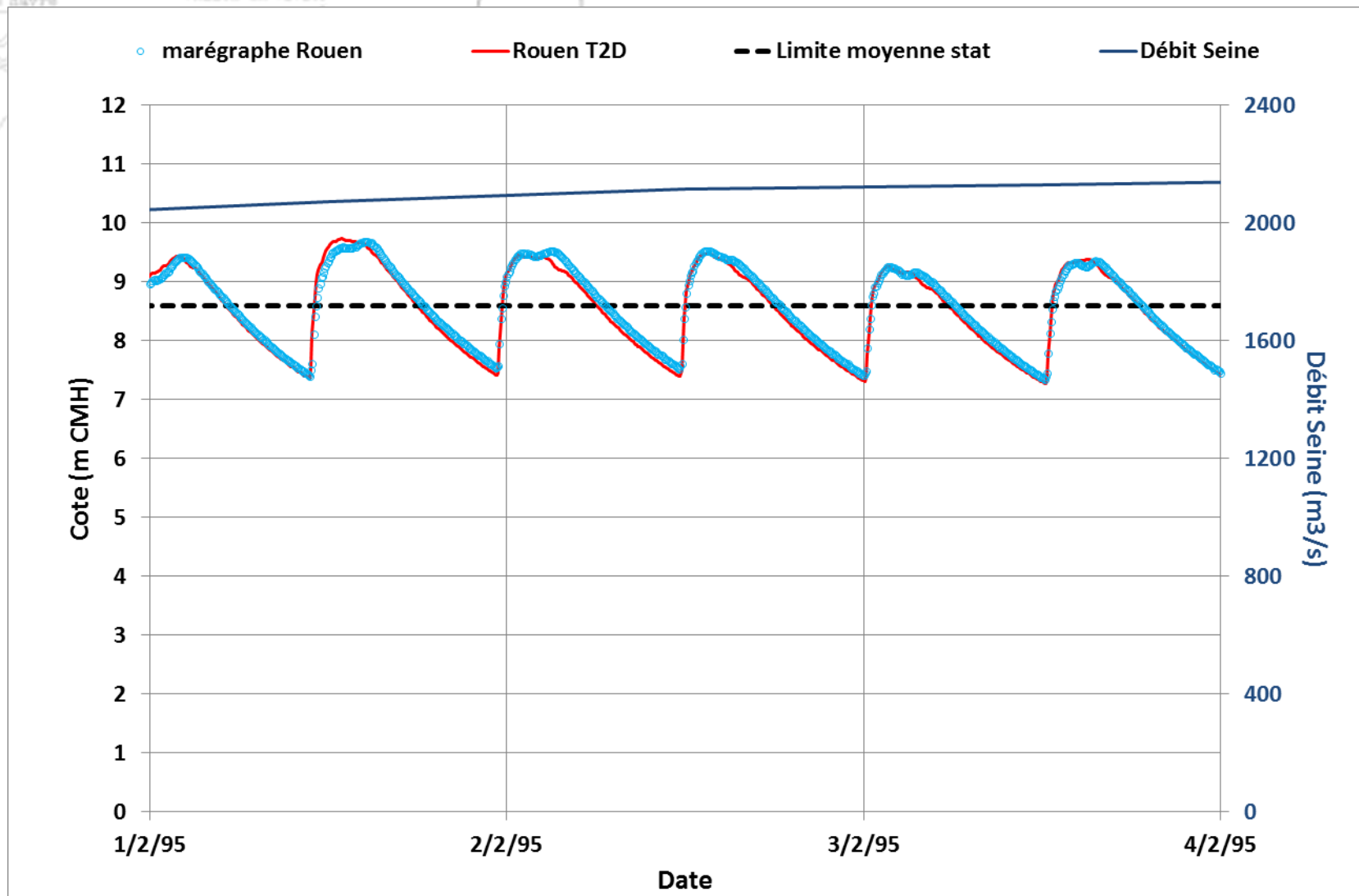
Événement de 1995 : La Bouille



Événement de 1995 : Petit Couronne

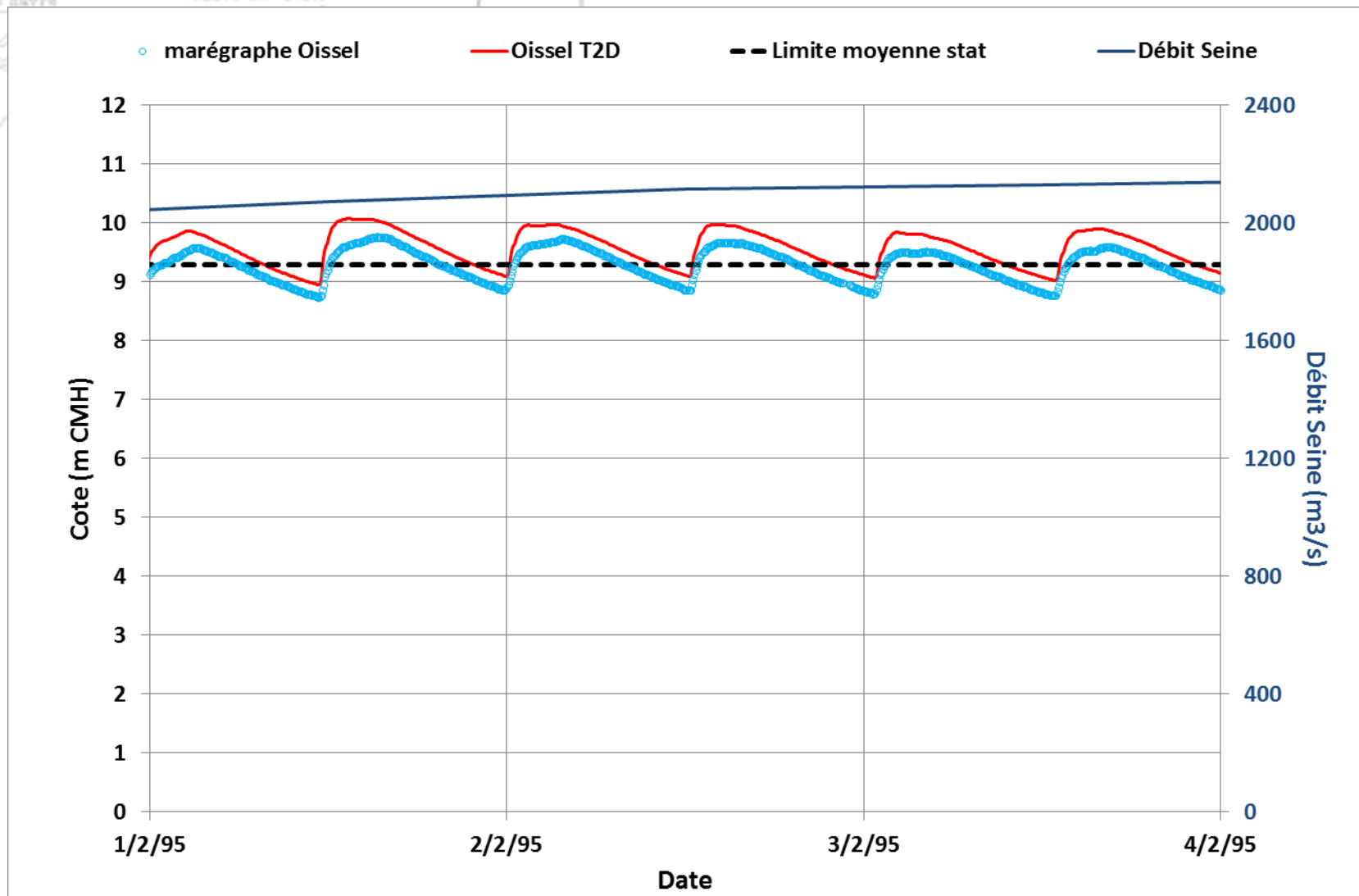


Événement de 1995 : Rouen



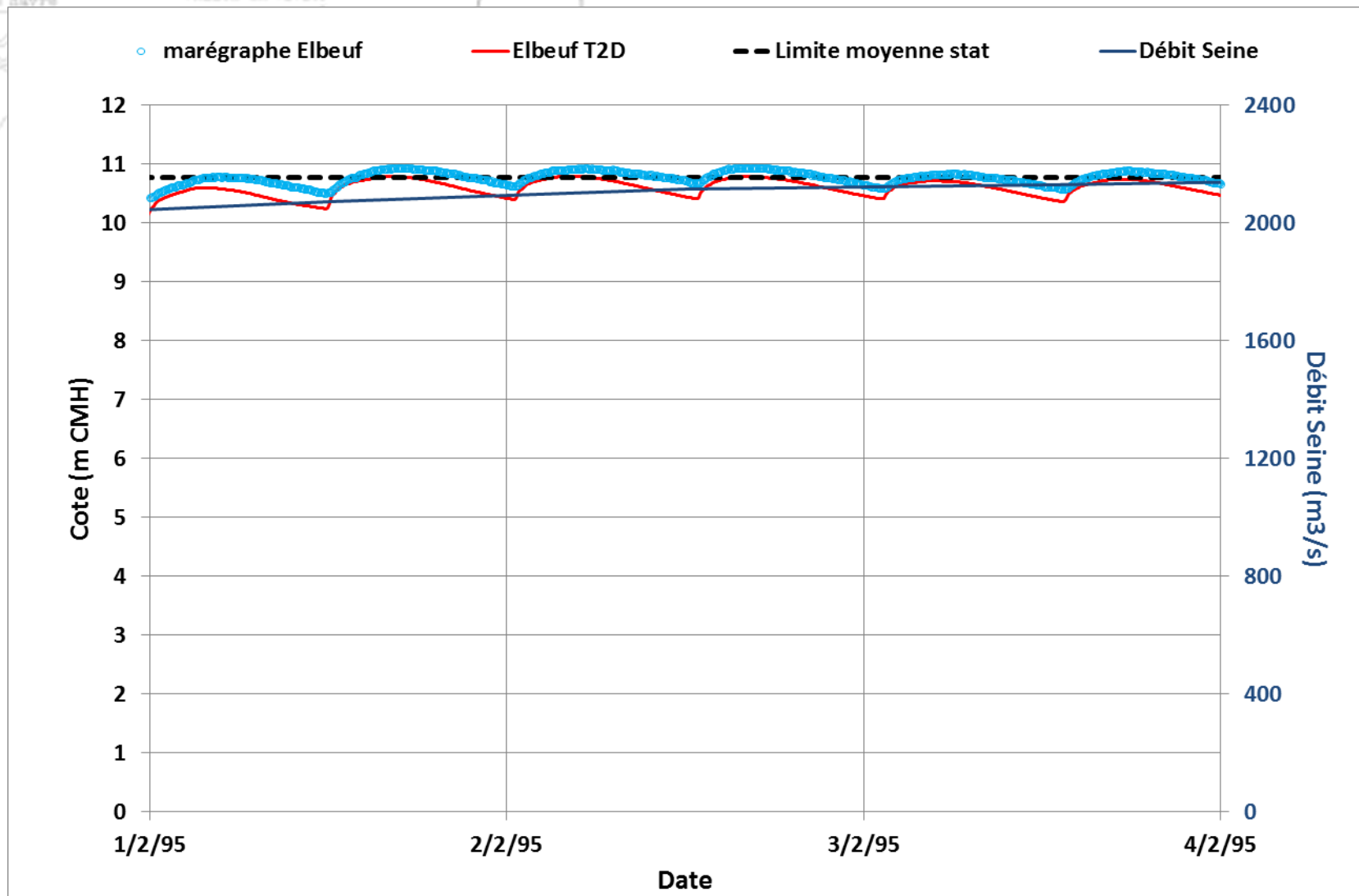
D – Figure 113

Événement de 1995 : Oissel

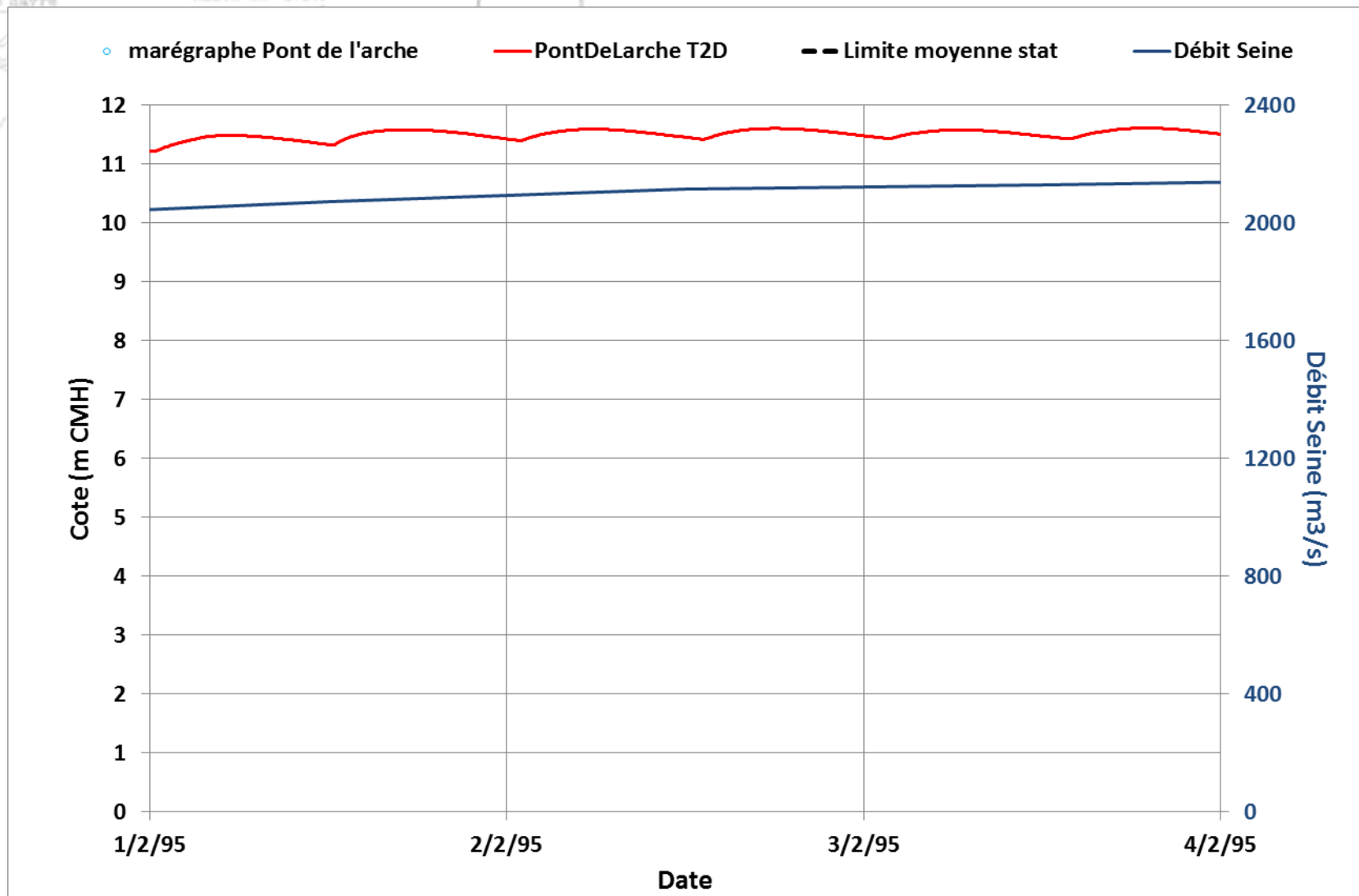


D – Figure 114

Événement de 1995 : Elbeuf

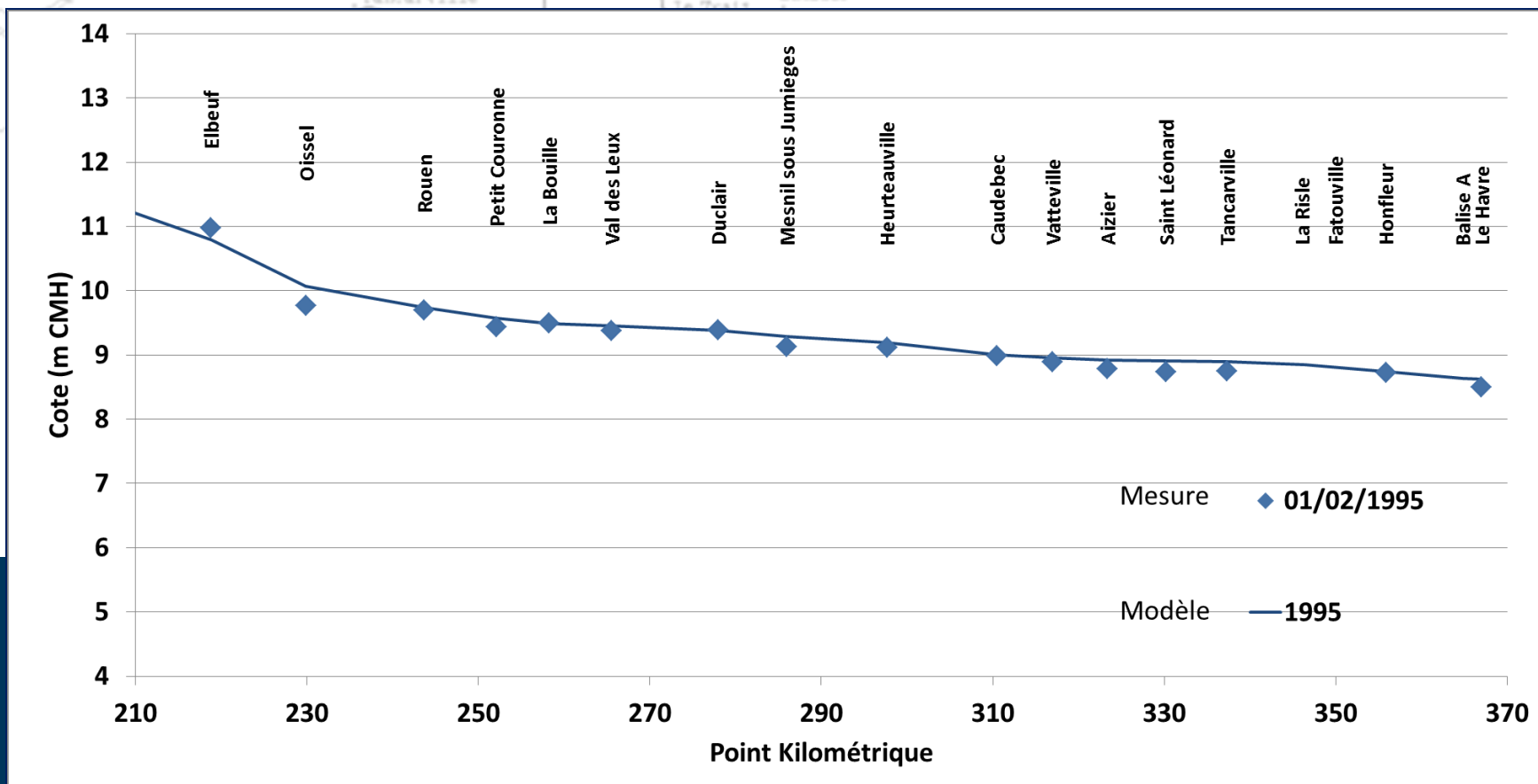


Événement de 1995 : Pont-de-l'Arche



D – Figure 116

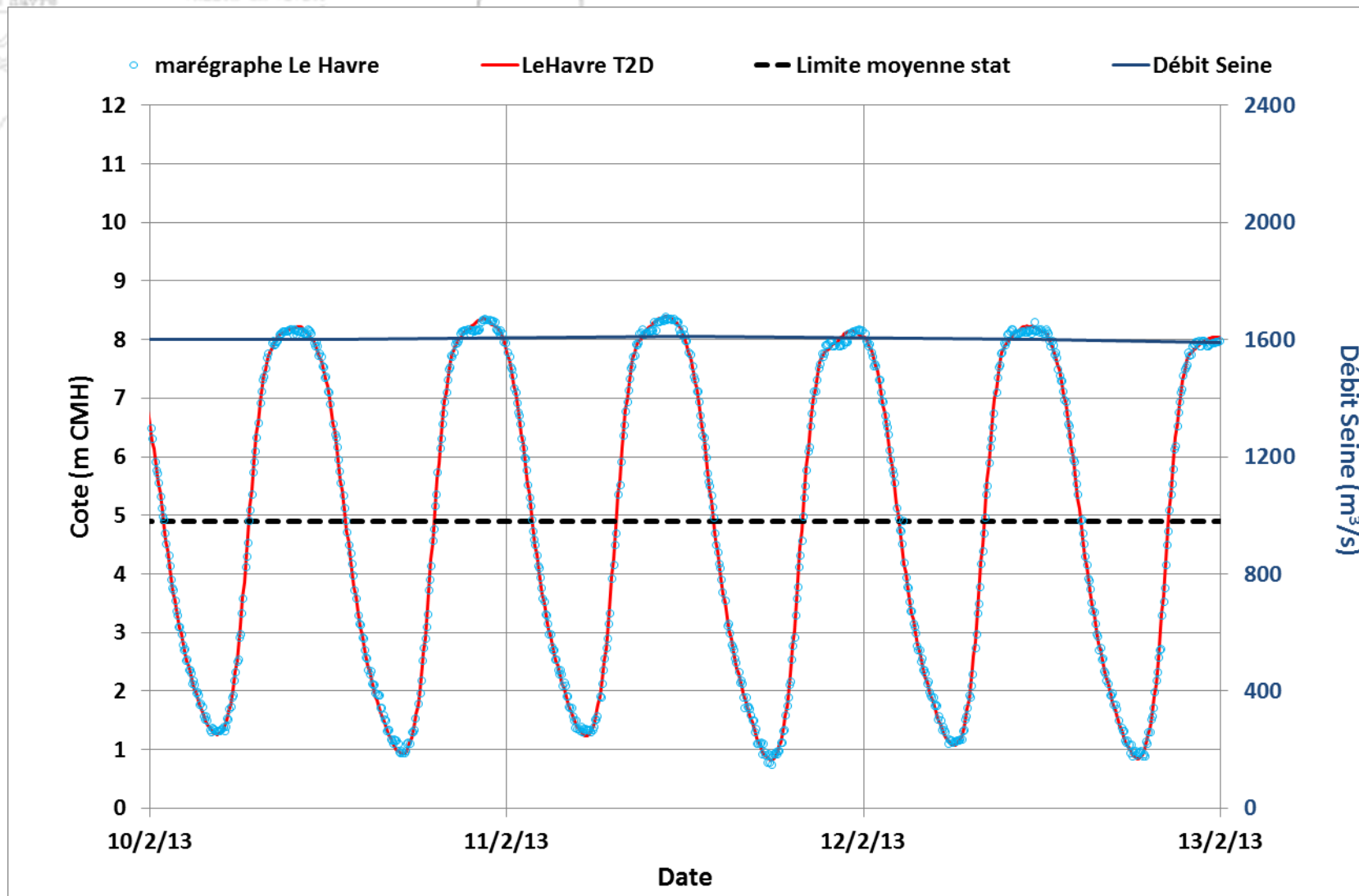
Événement de 1995





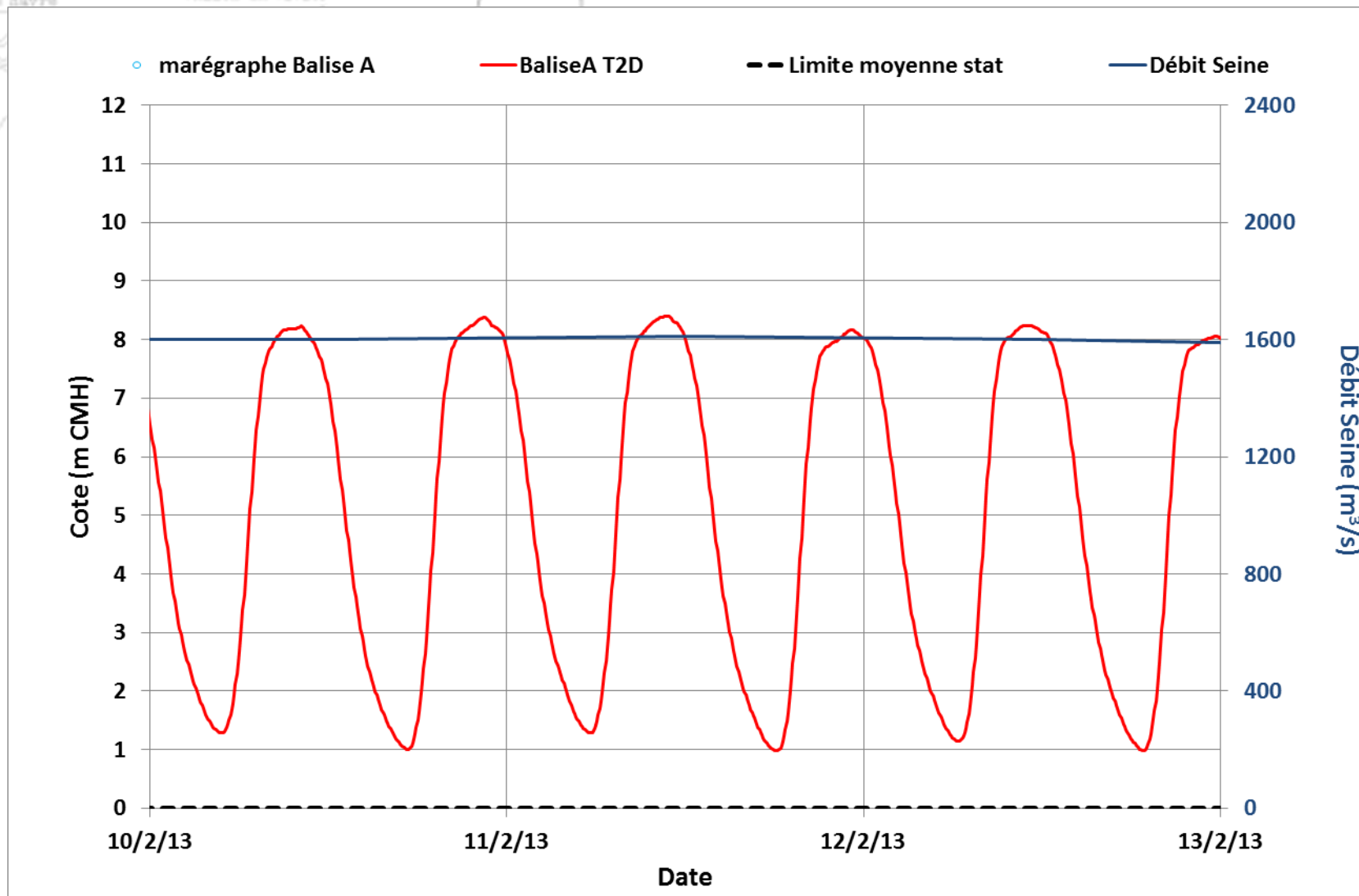
Simulation de crue 2013

Événement de 2013 : Le Havre

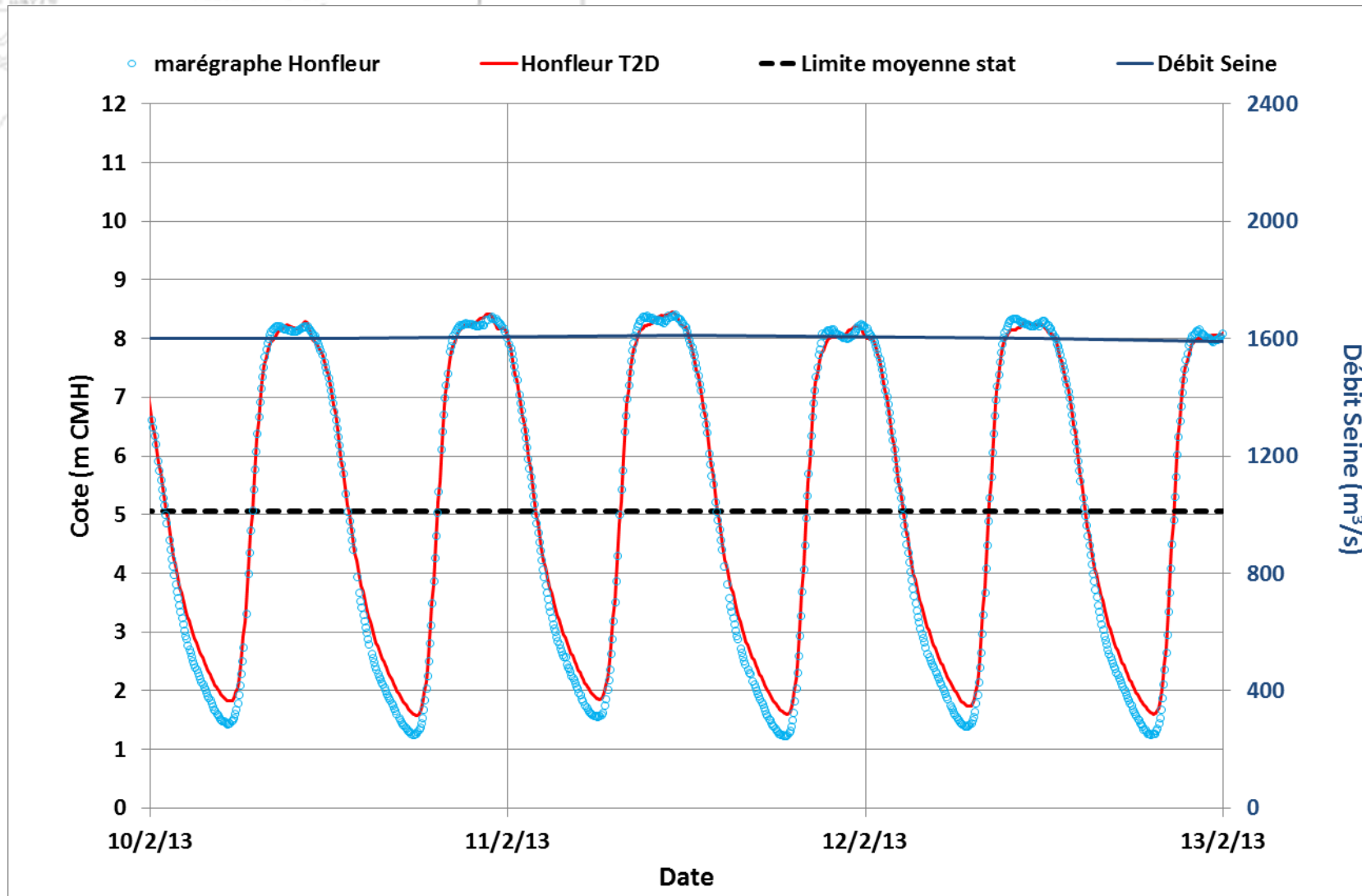


D – Figure 119

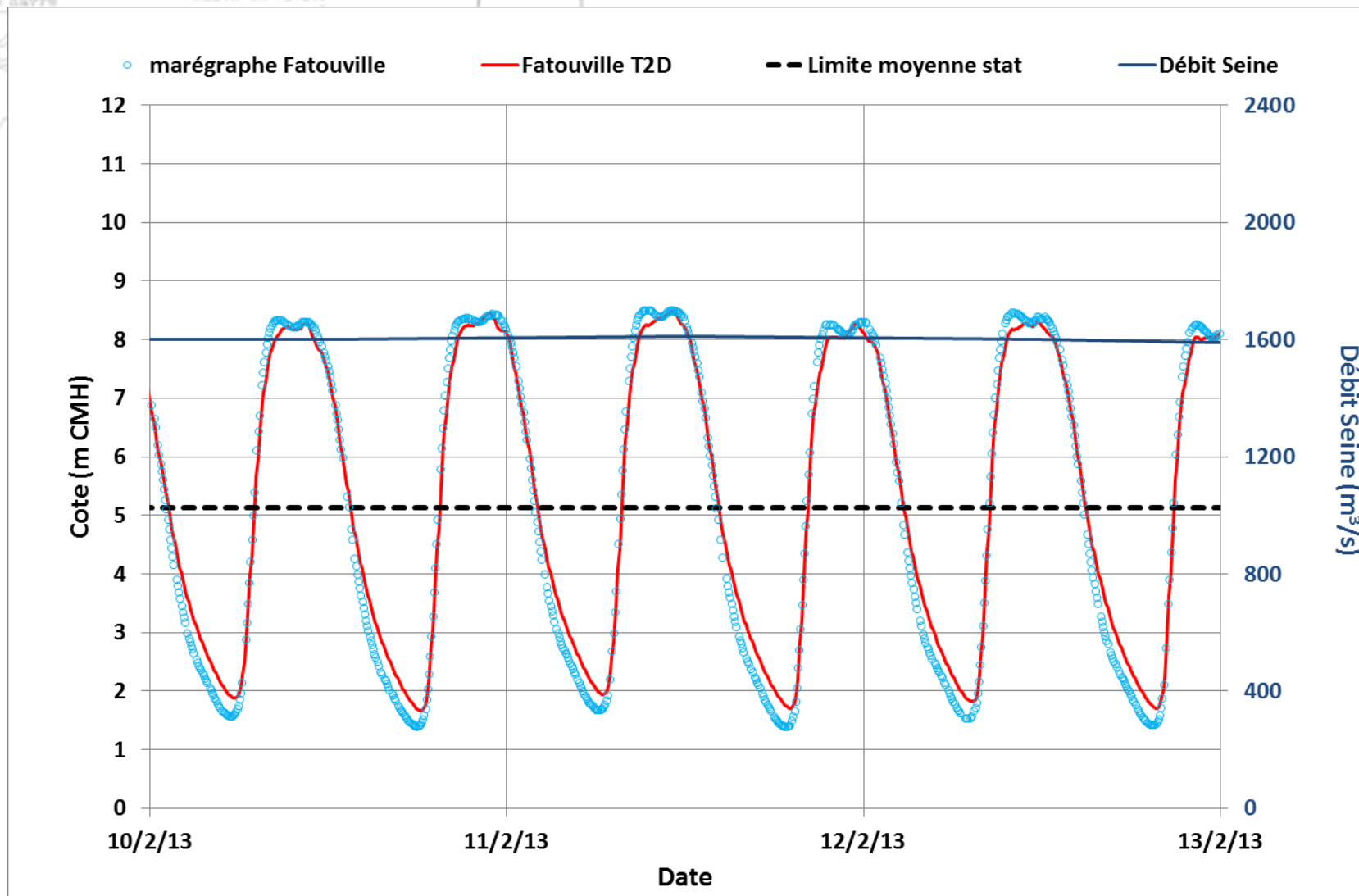
Événement de 2013 : Balise A



Événement de 2013 : Honfleur

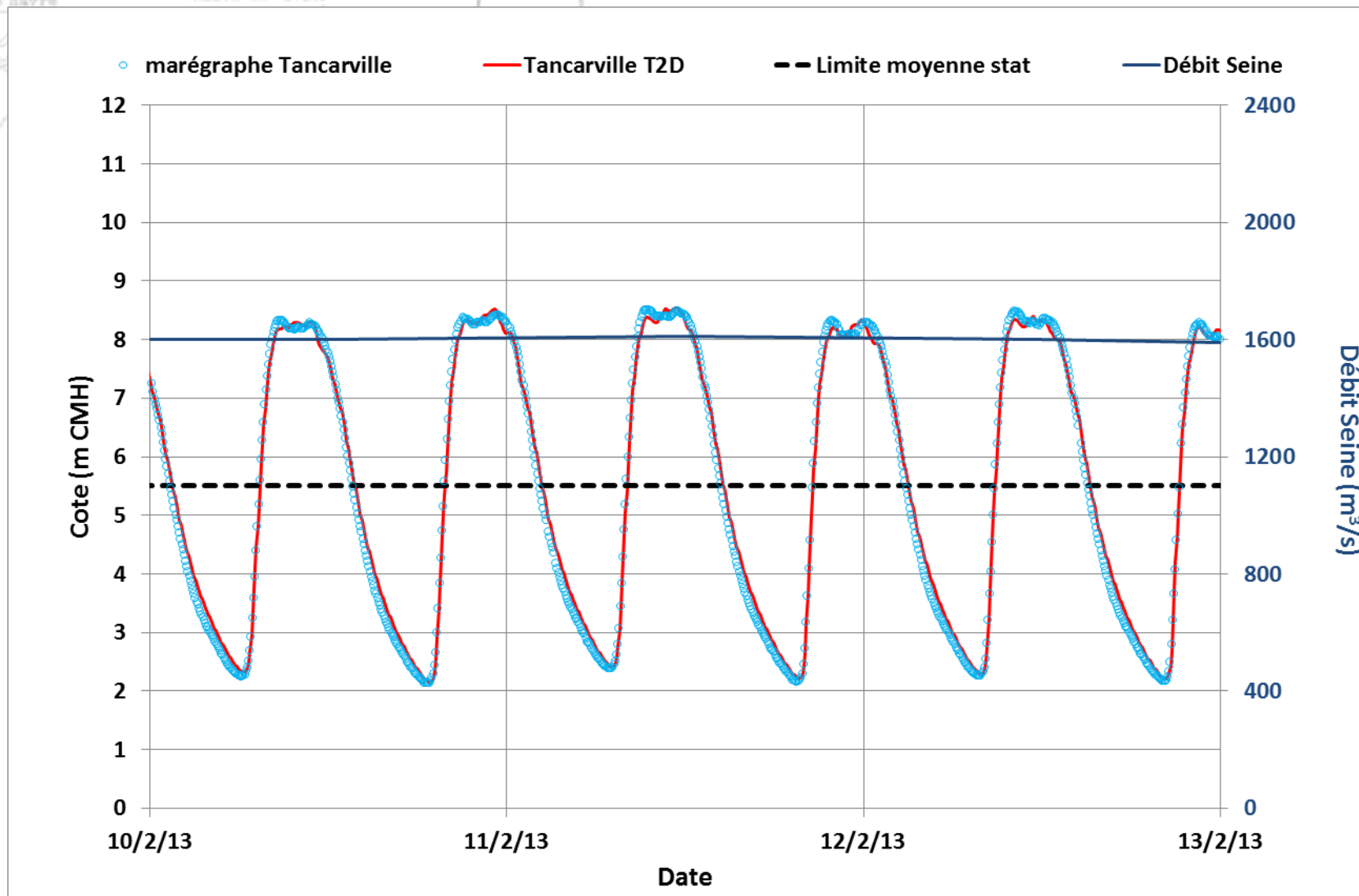


Événement de 2013 : Fatouville



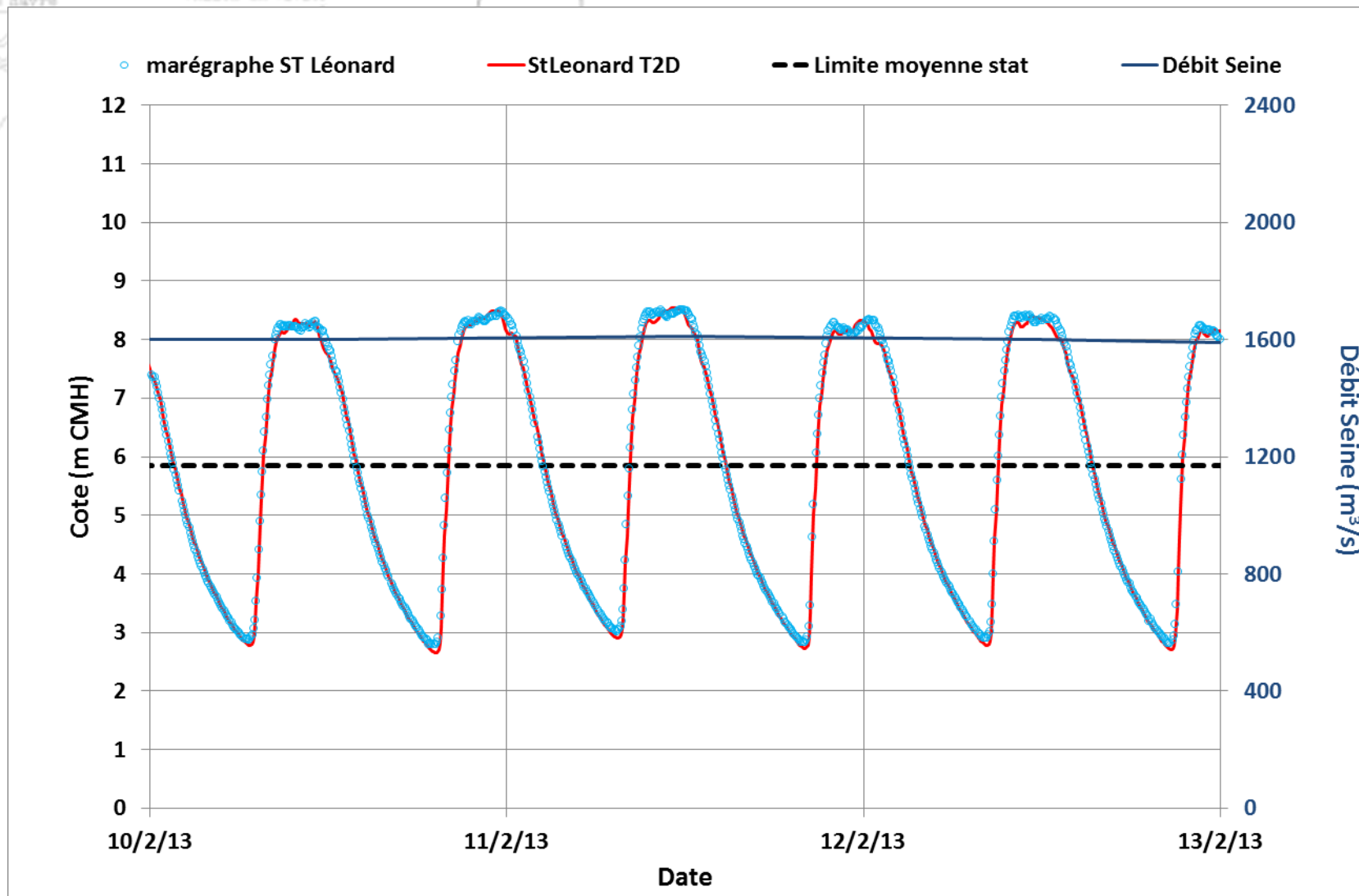
D – Figure 122

Événement de 2013 : Tancarville

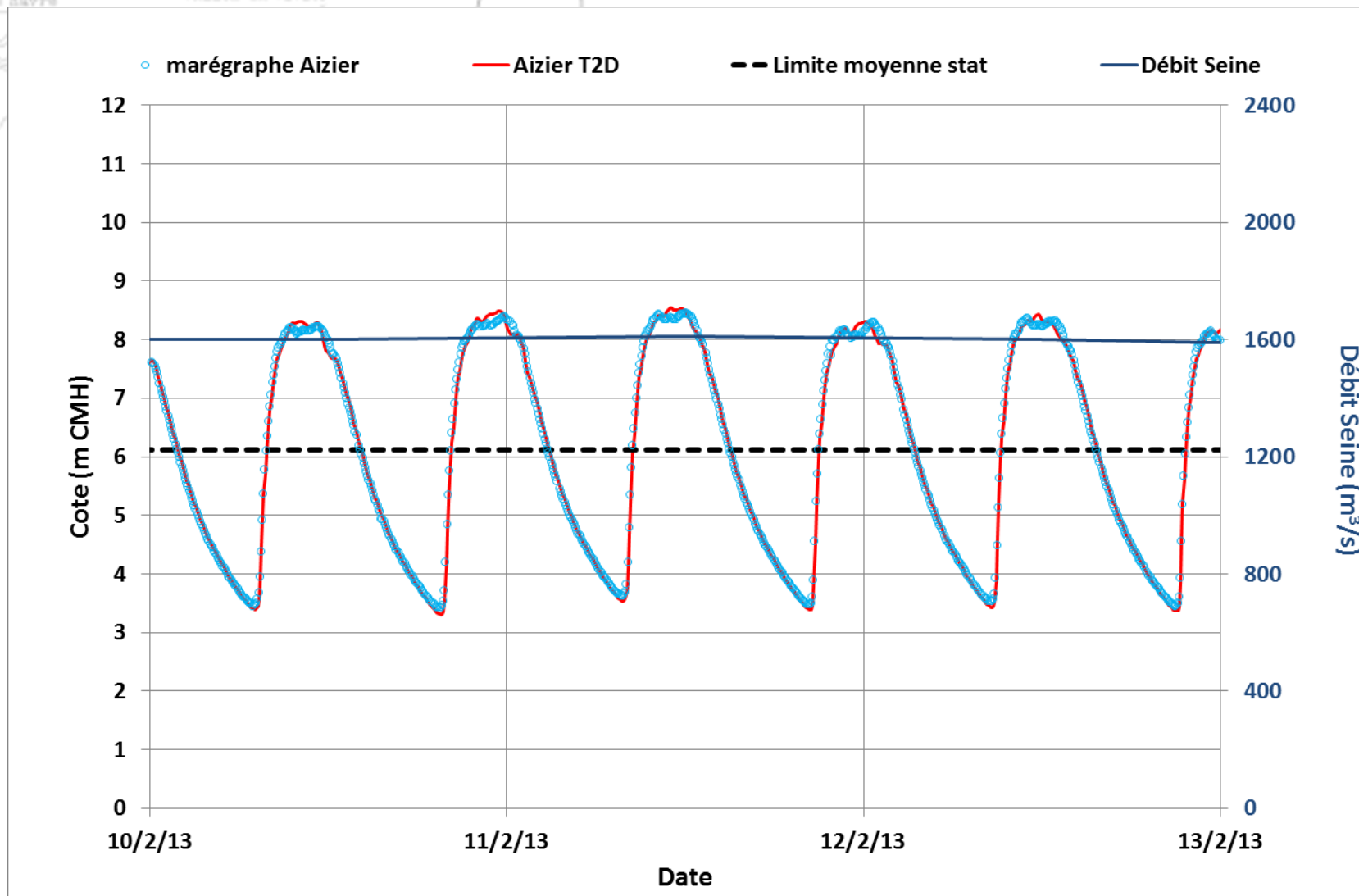


D – Figure 123

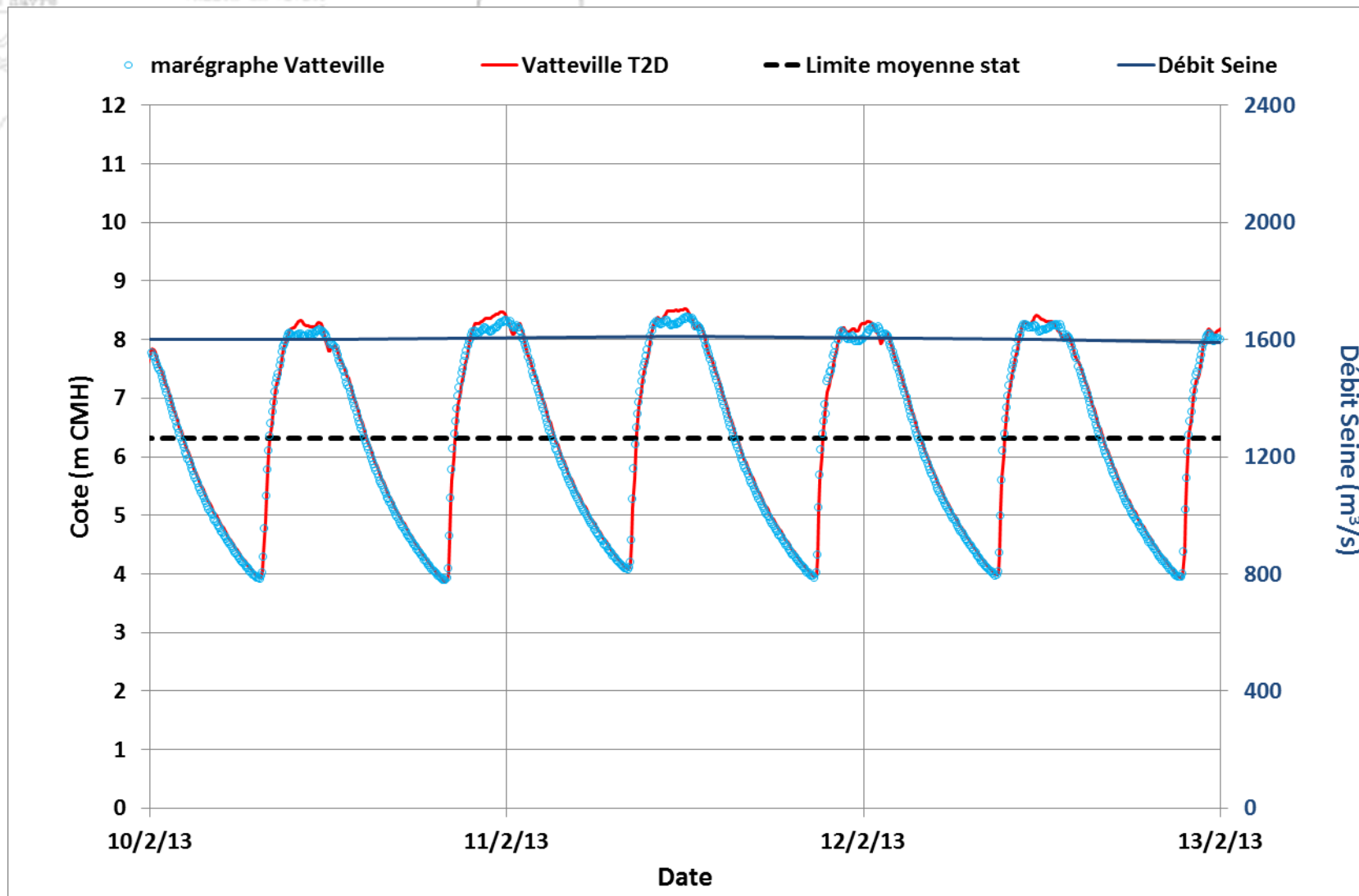
Événement de 2013 : St Léonard



Événement de 2013 : Aizier

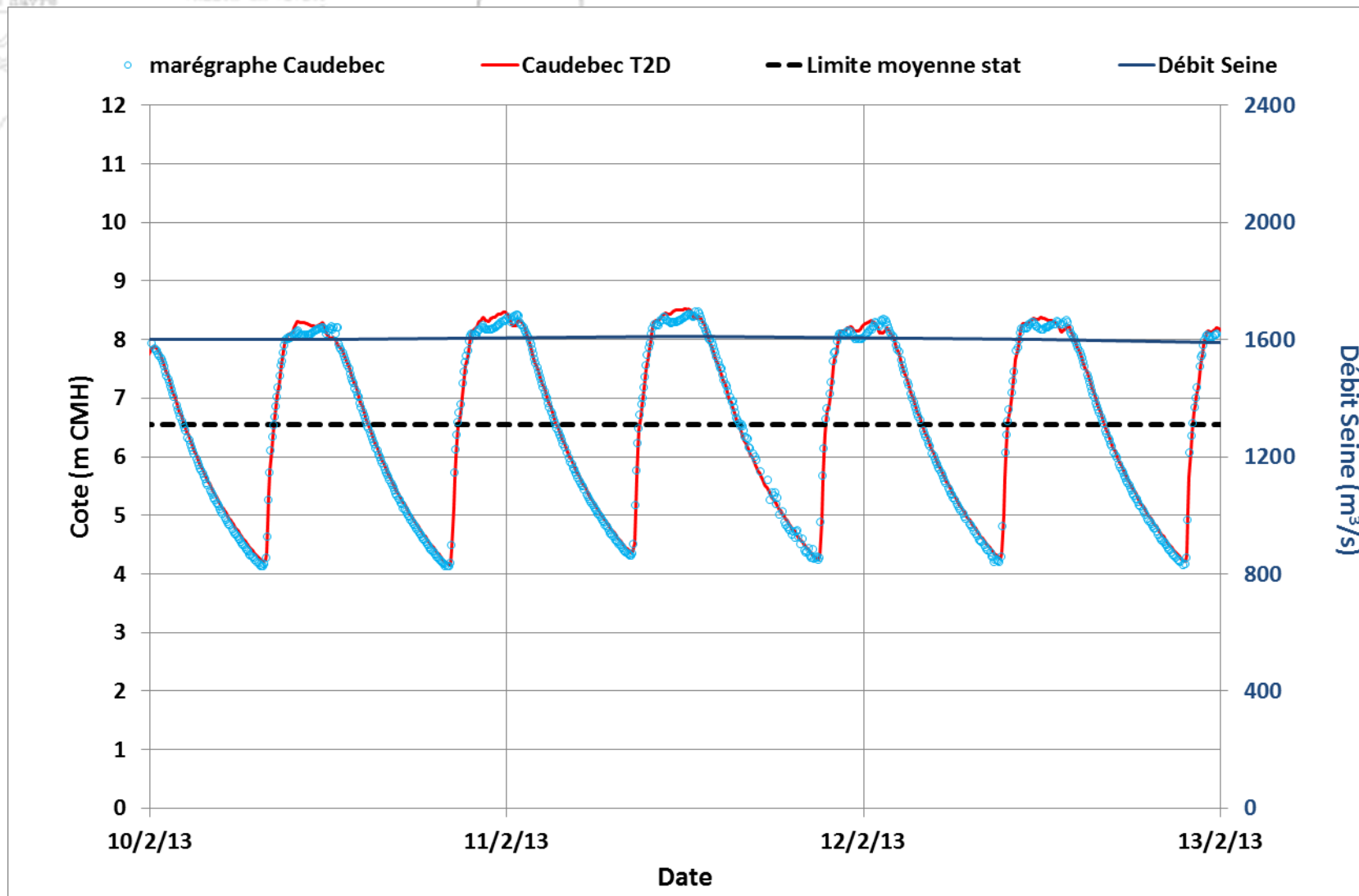


Événement de 2013 : Vatteville



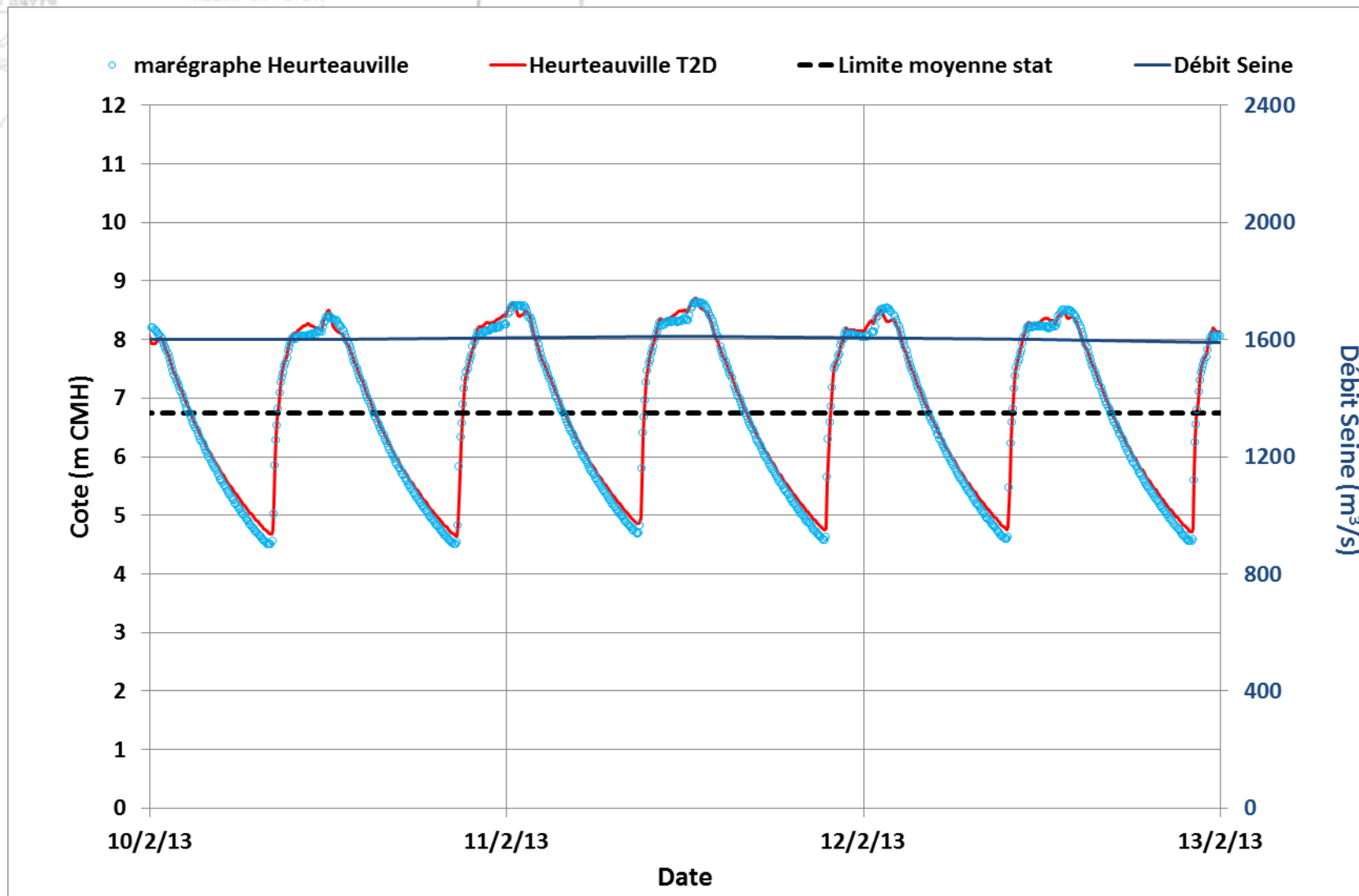
D – Figure 126

Événement de 2013 : Caudebec



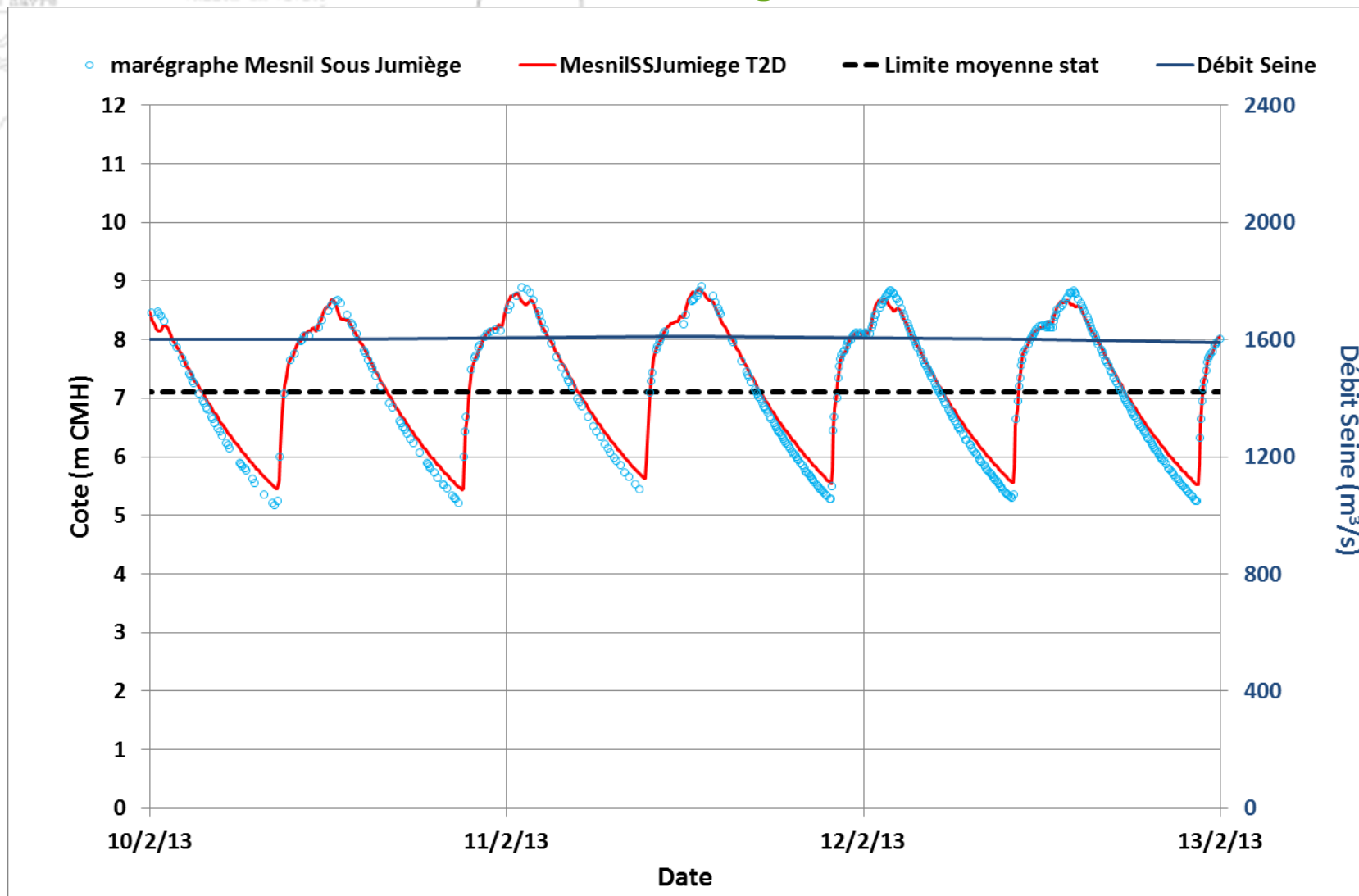
D – Figure 127

Événement de 2013 : Heurteauville



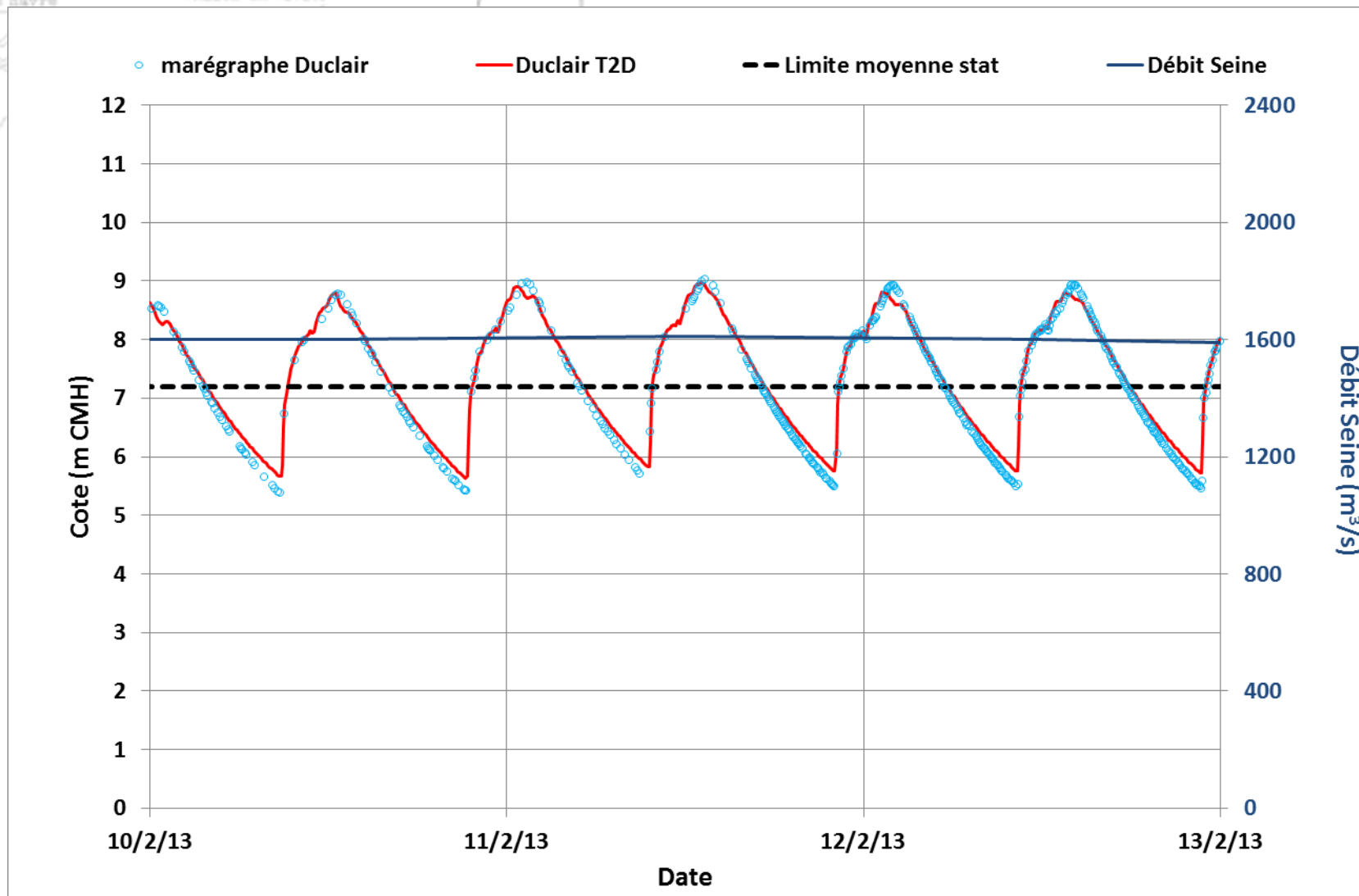
D – Figure 128

Événement de 2013 : Mesnil-sous-Jumièges



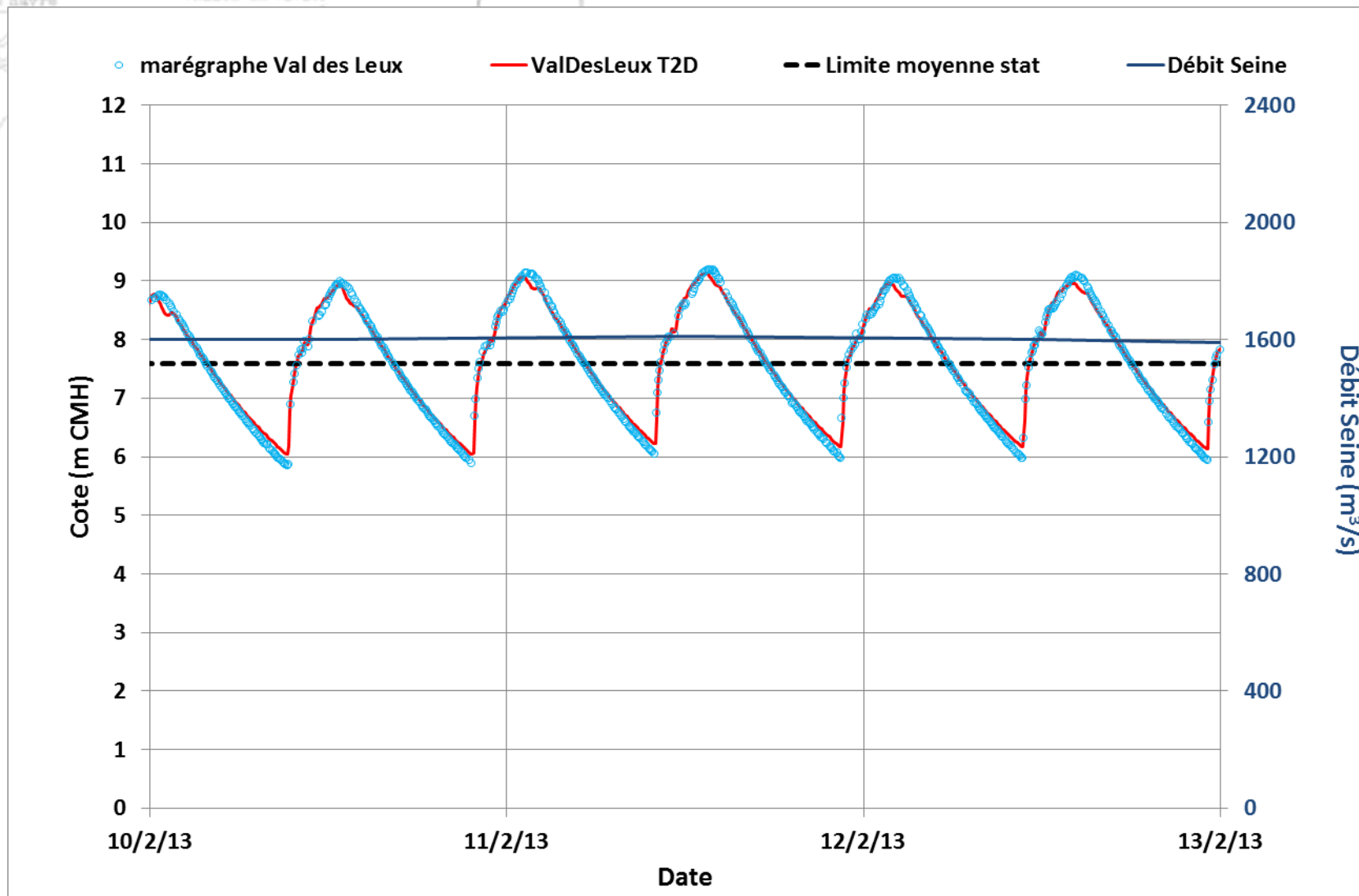
D – Figure 129

Événement de 2013 : Duclair

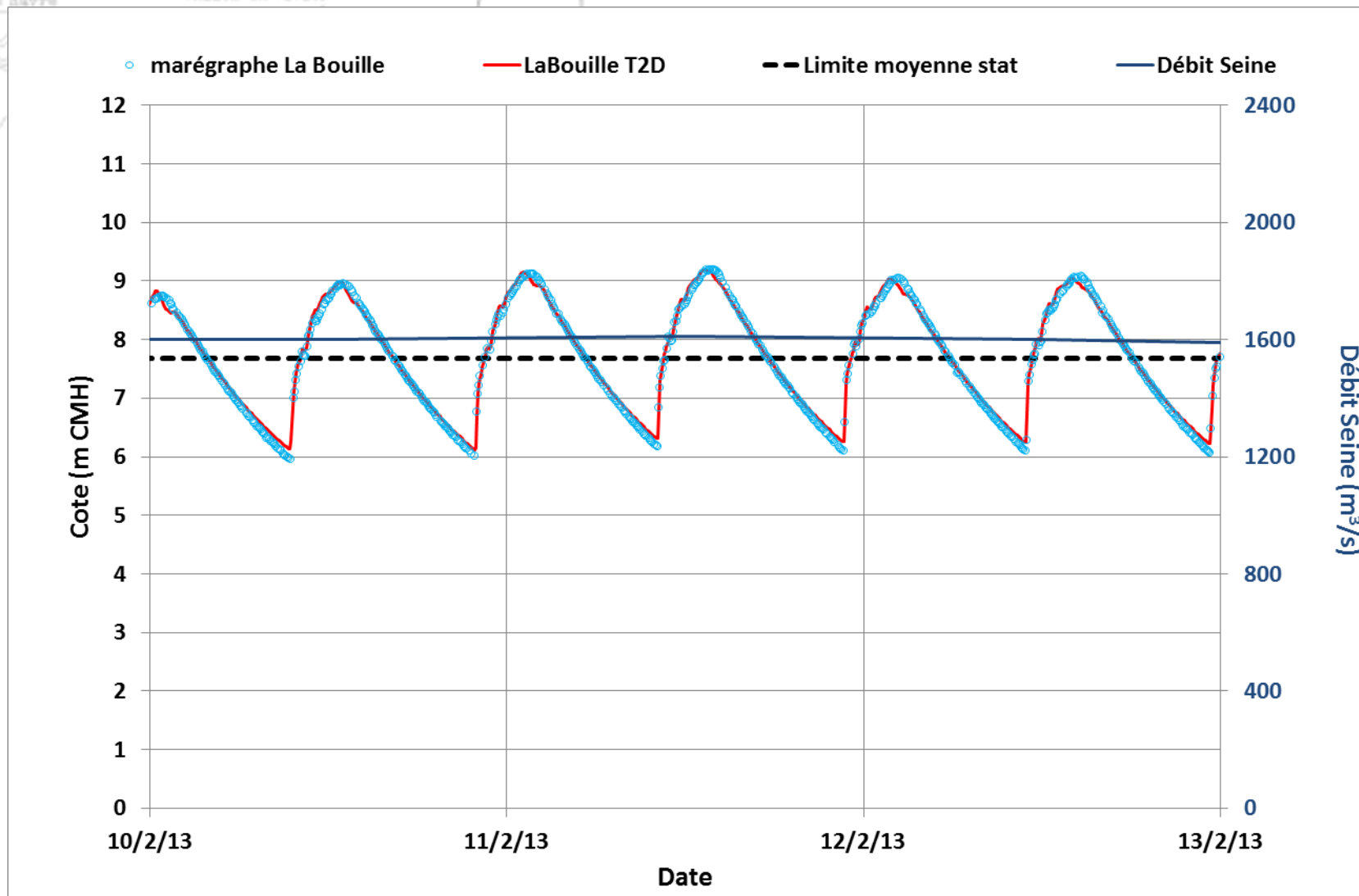


D – Figure 130

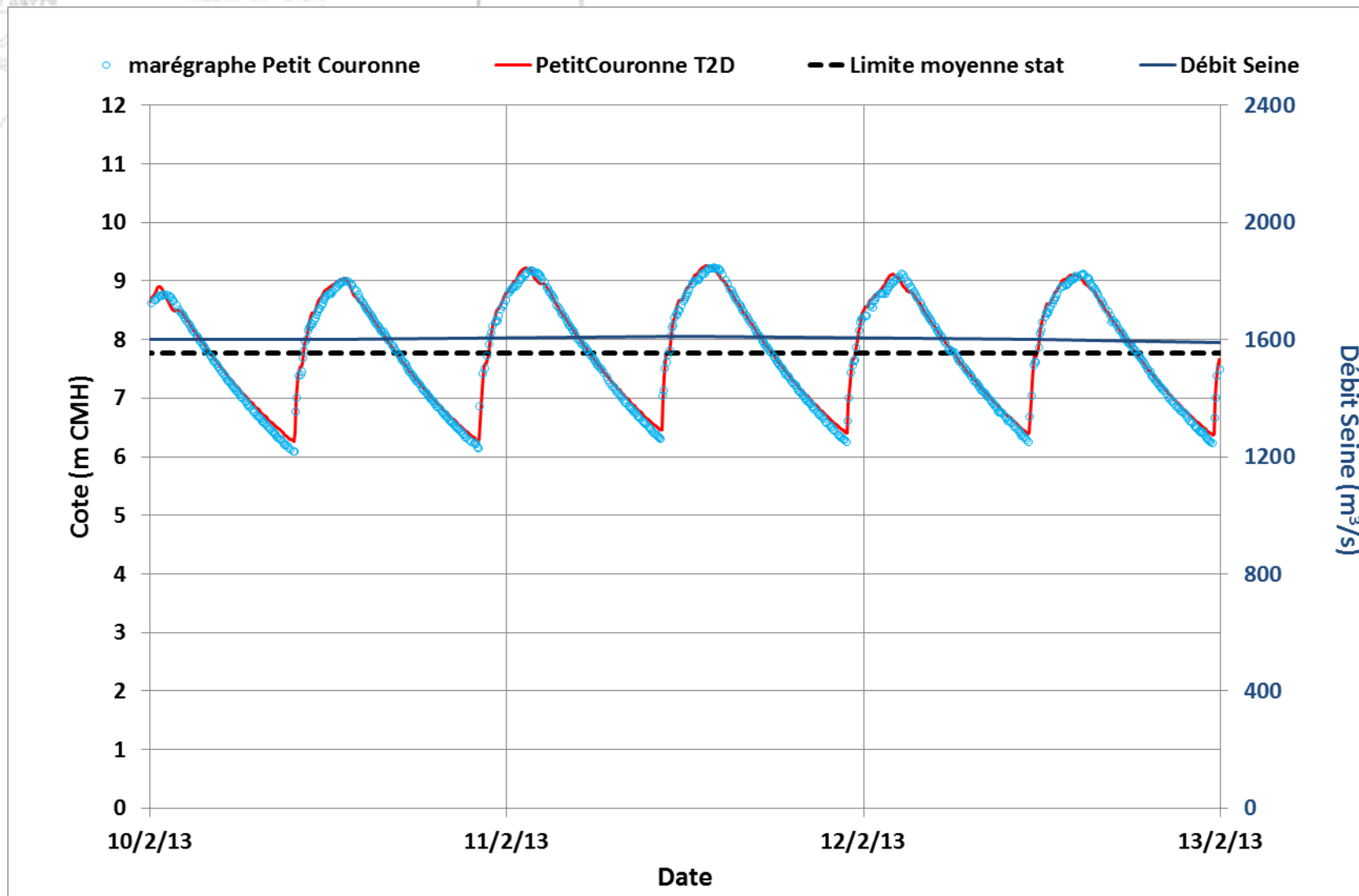
Événement de 2013 : Val-des-Leux



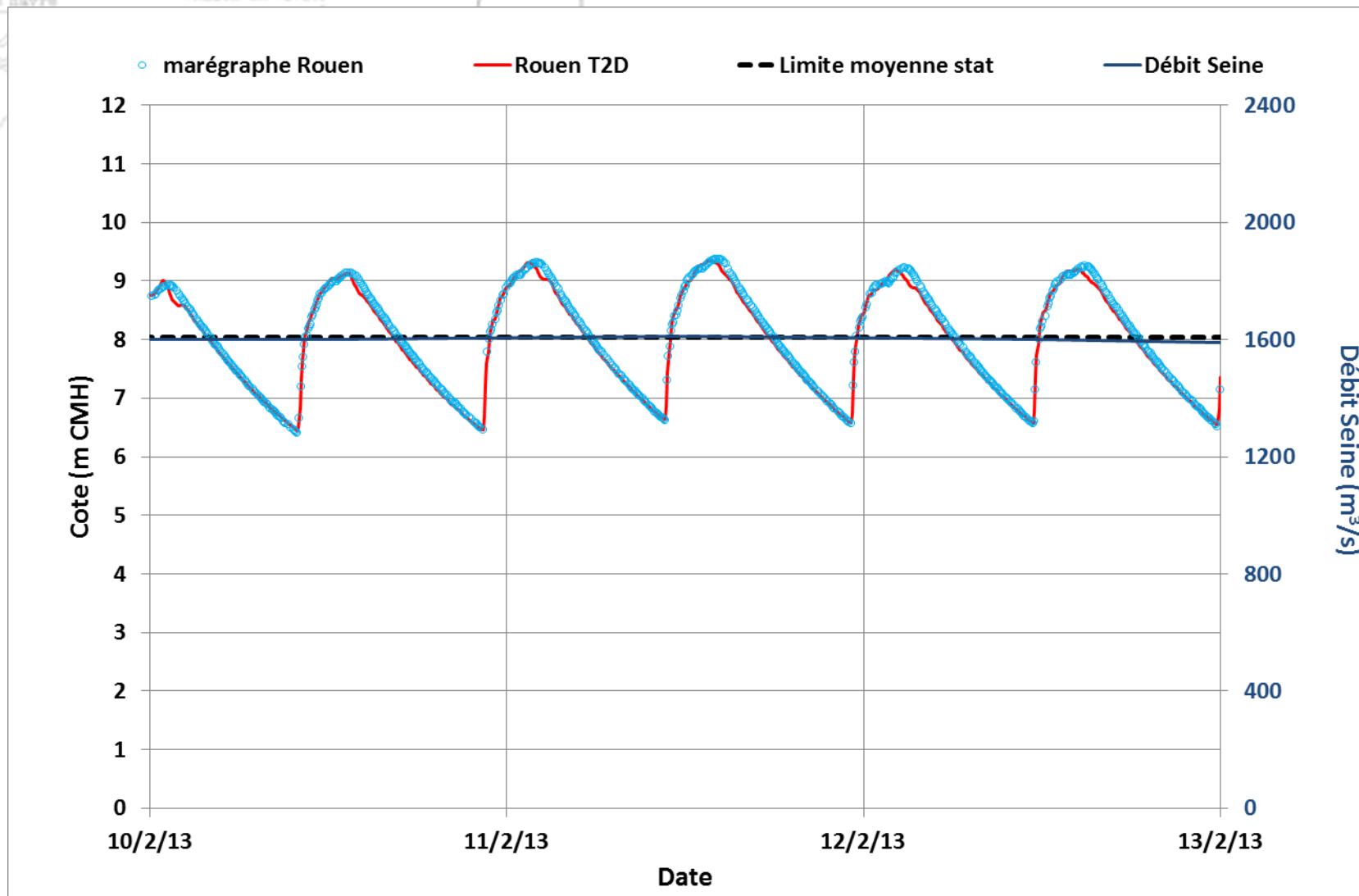
Événement de 2013 : La Bouille



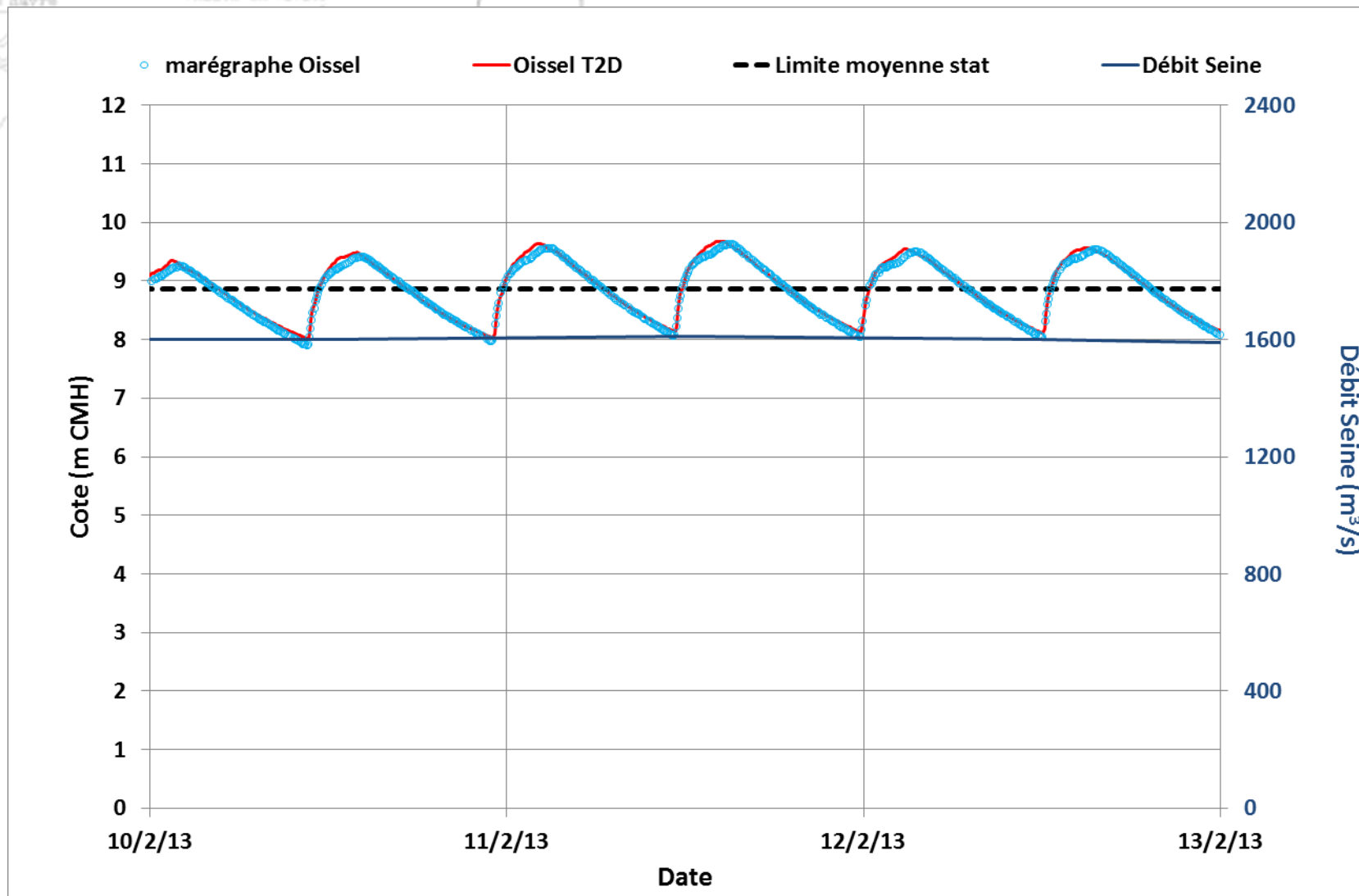
Événement de 2013 : Petit Couronne



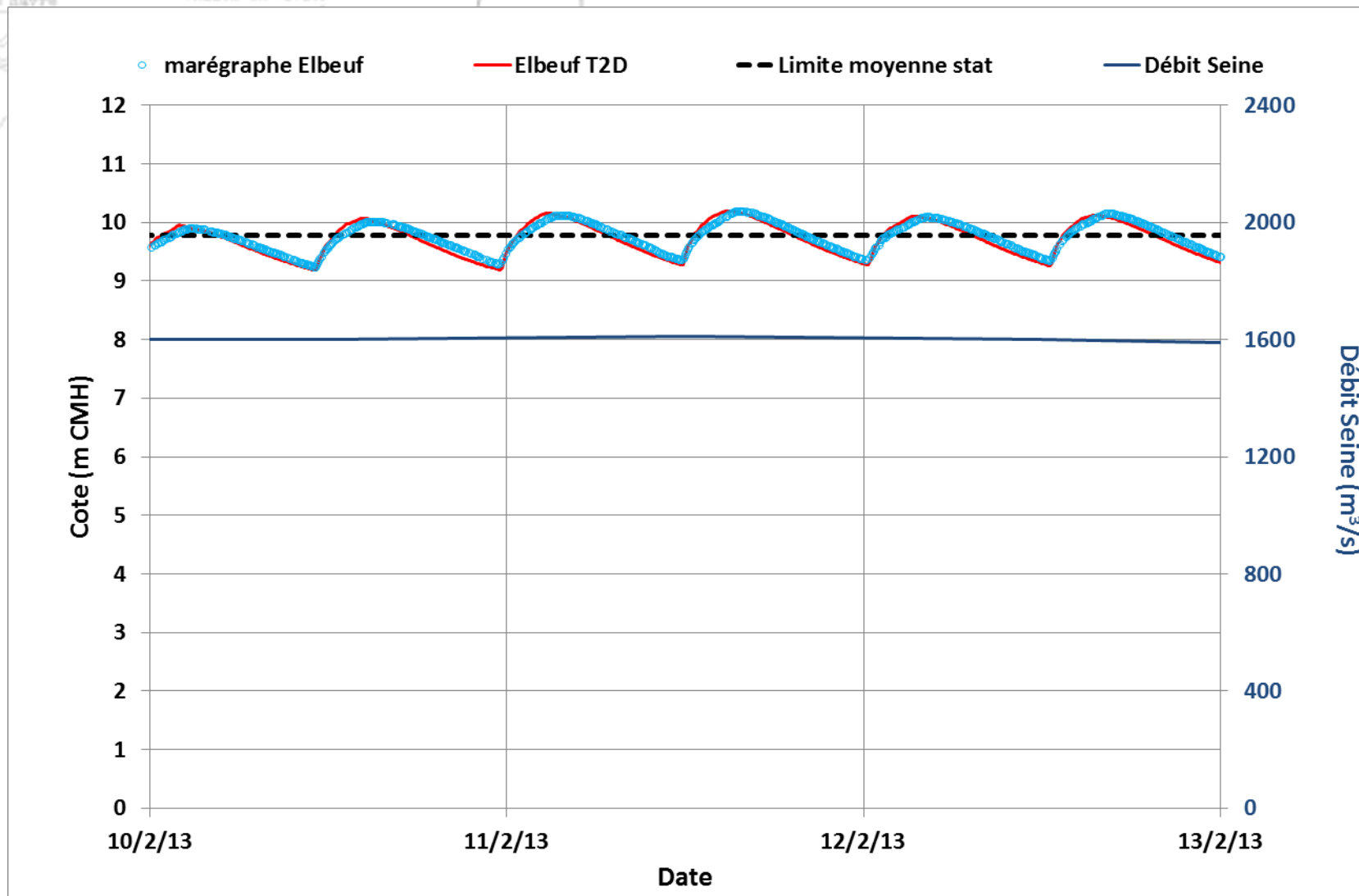
Événement de 2013 : Rouen



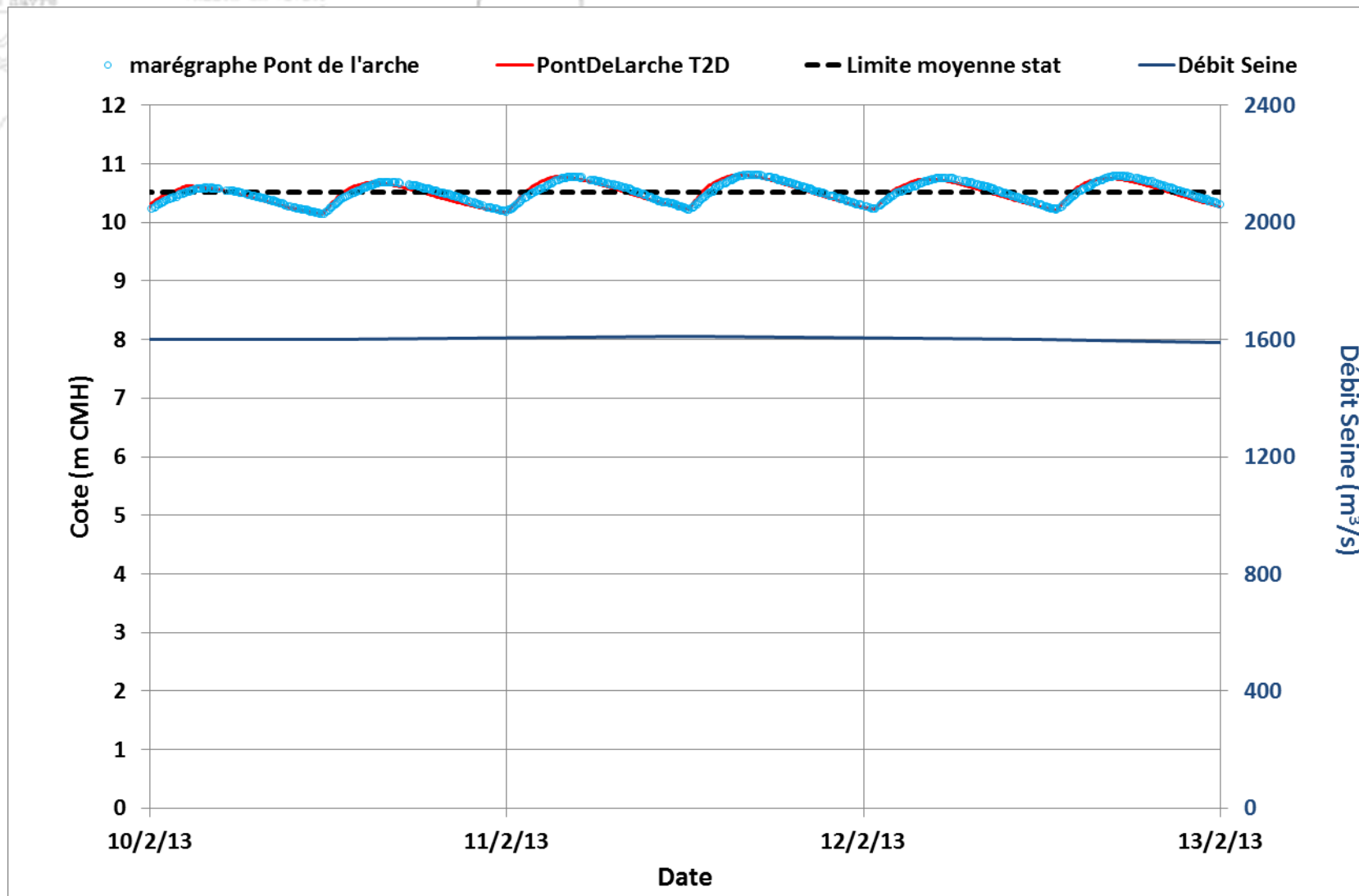
Événement de 2013 : Oissel



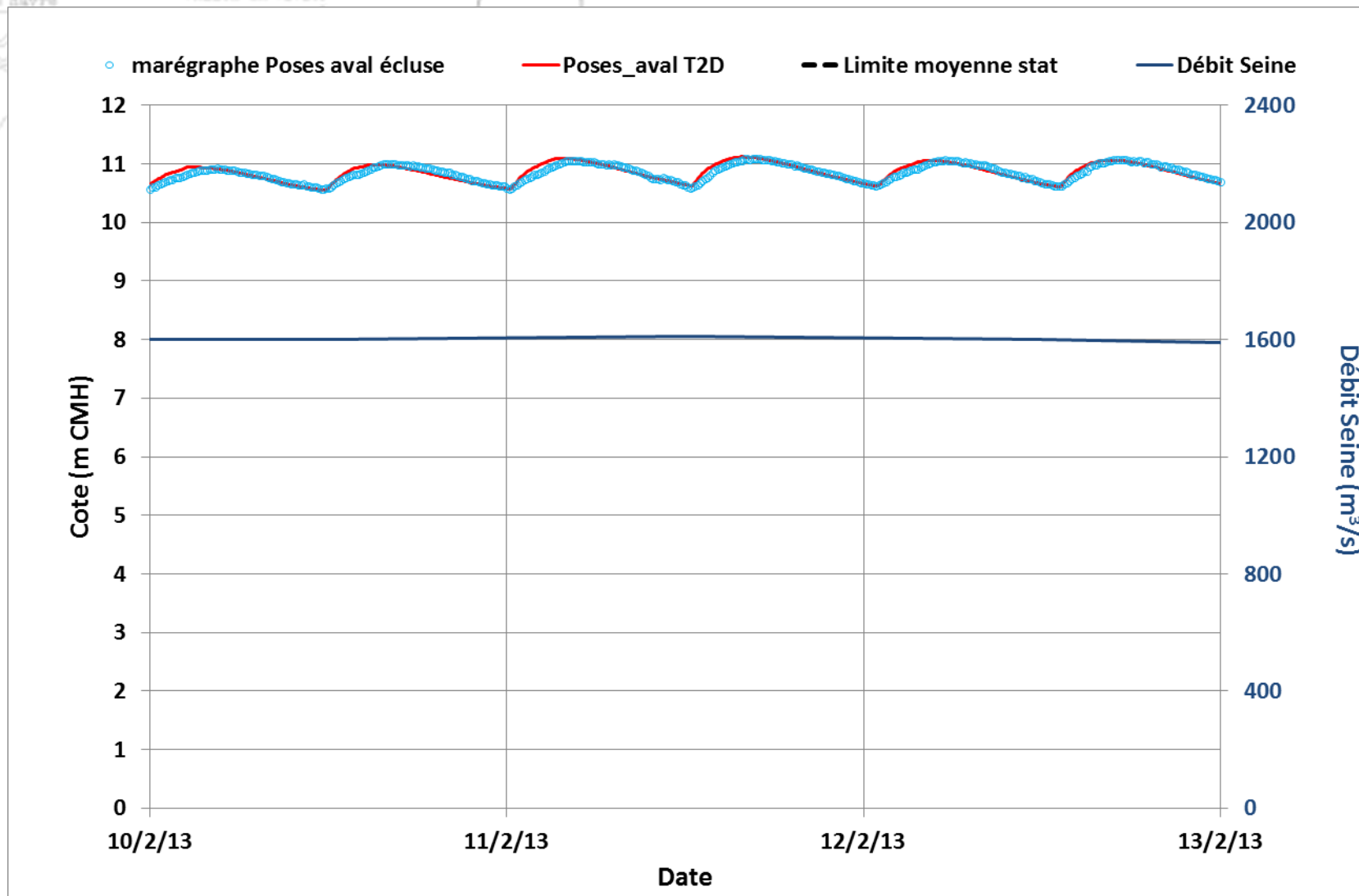
Événement de 2013 : Elbeuf



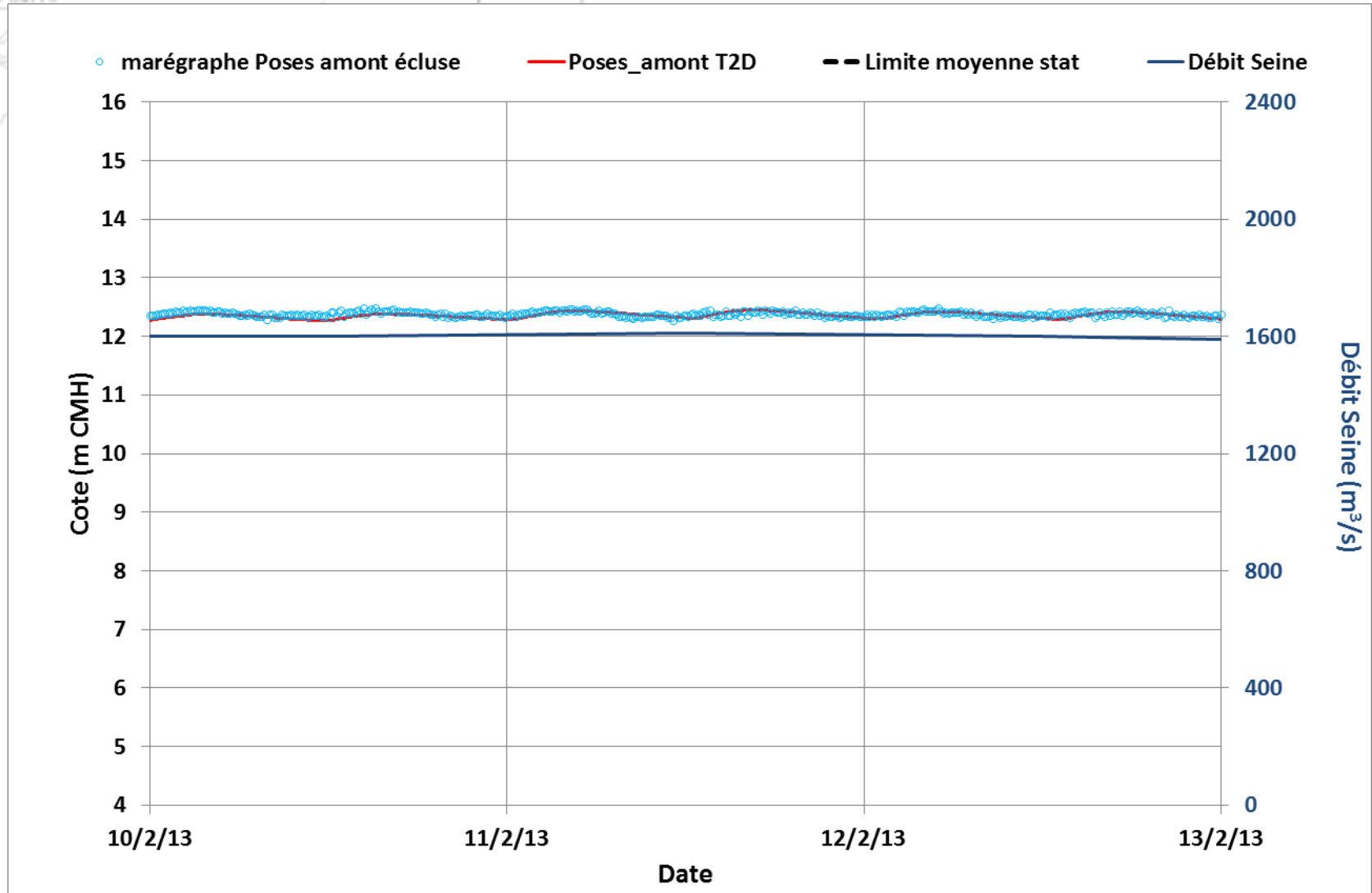
Événement de 2013 : Pont-de-l'Arche



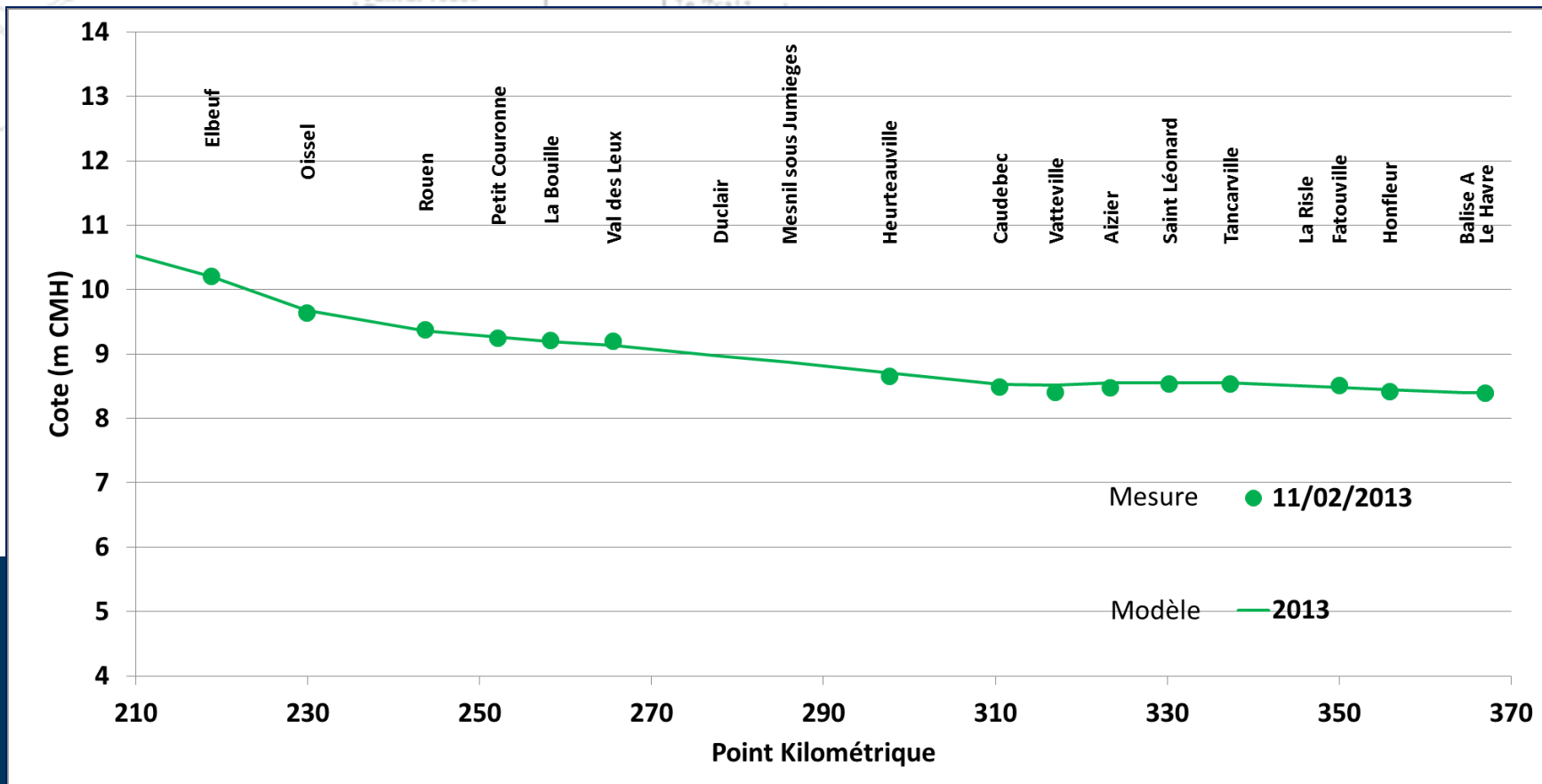
Événement de 2013 : Poses – Aval de l'écluse



Événement de 2013 : Poses – Amont de l'écluse



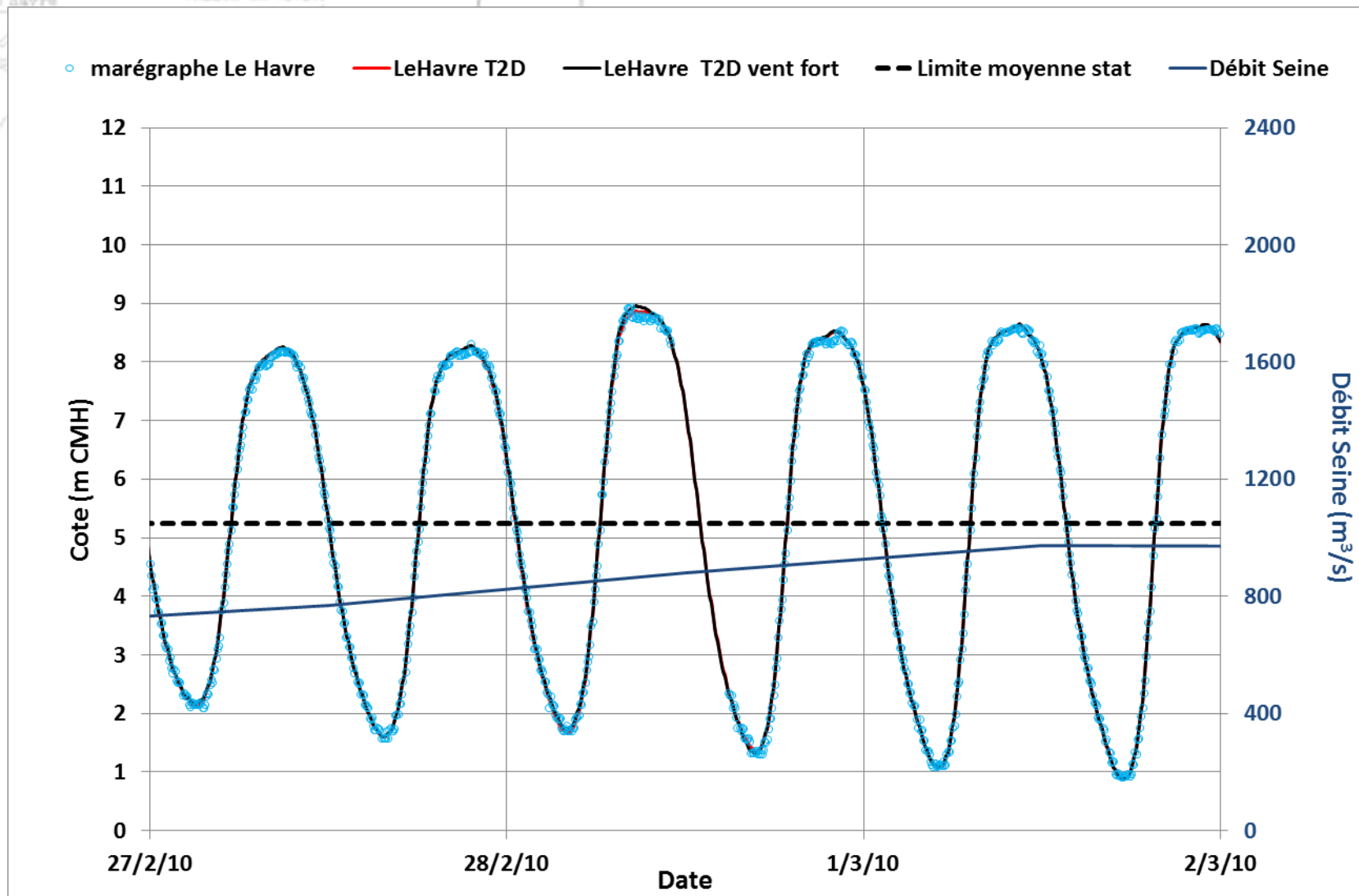
Événement de 2013





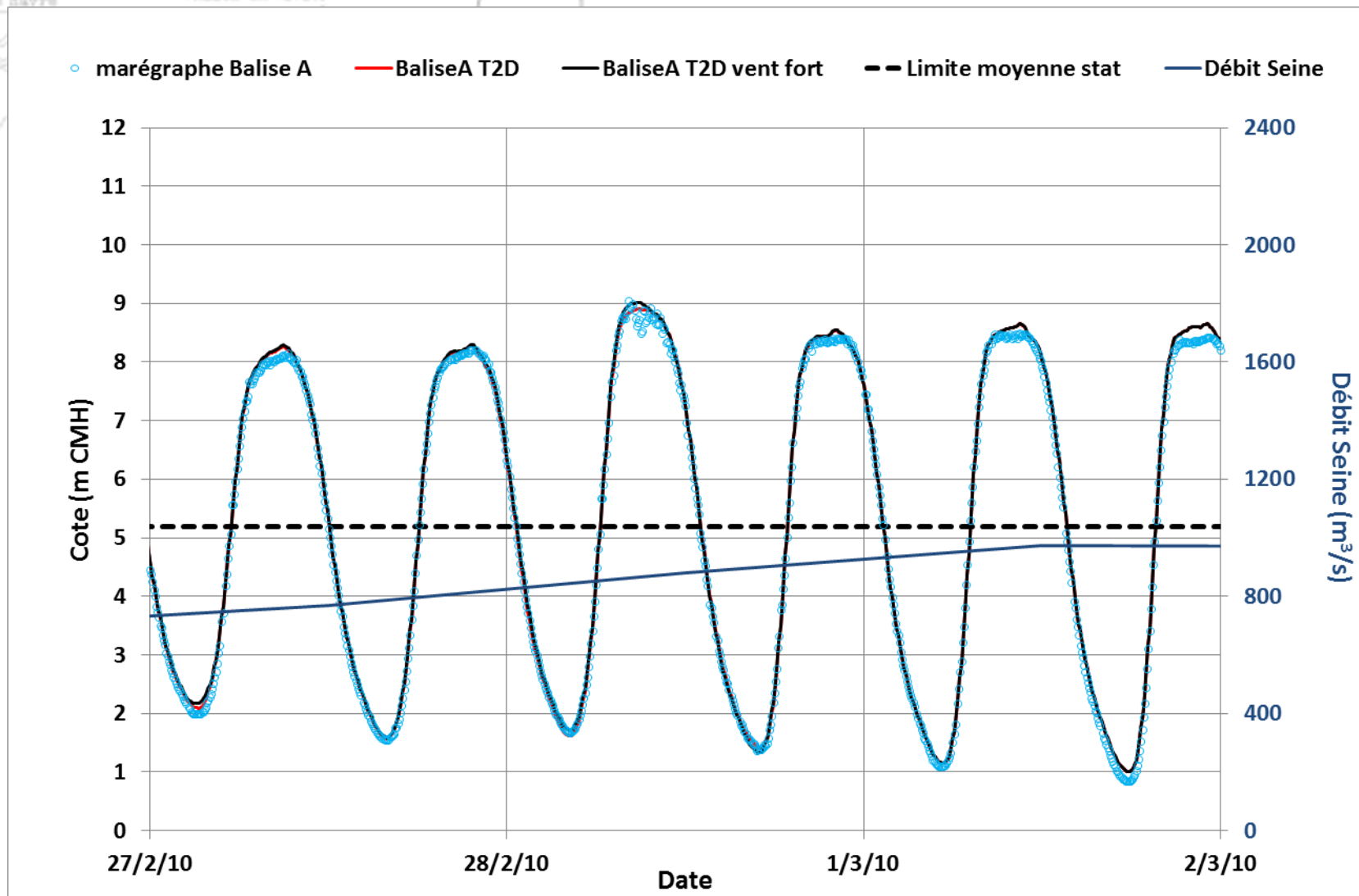
Simulation de tempête 2010 Xynthia – Vent renforcé

Événement de 2010 : Le Havre

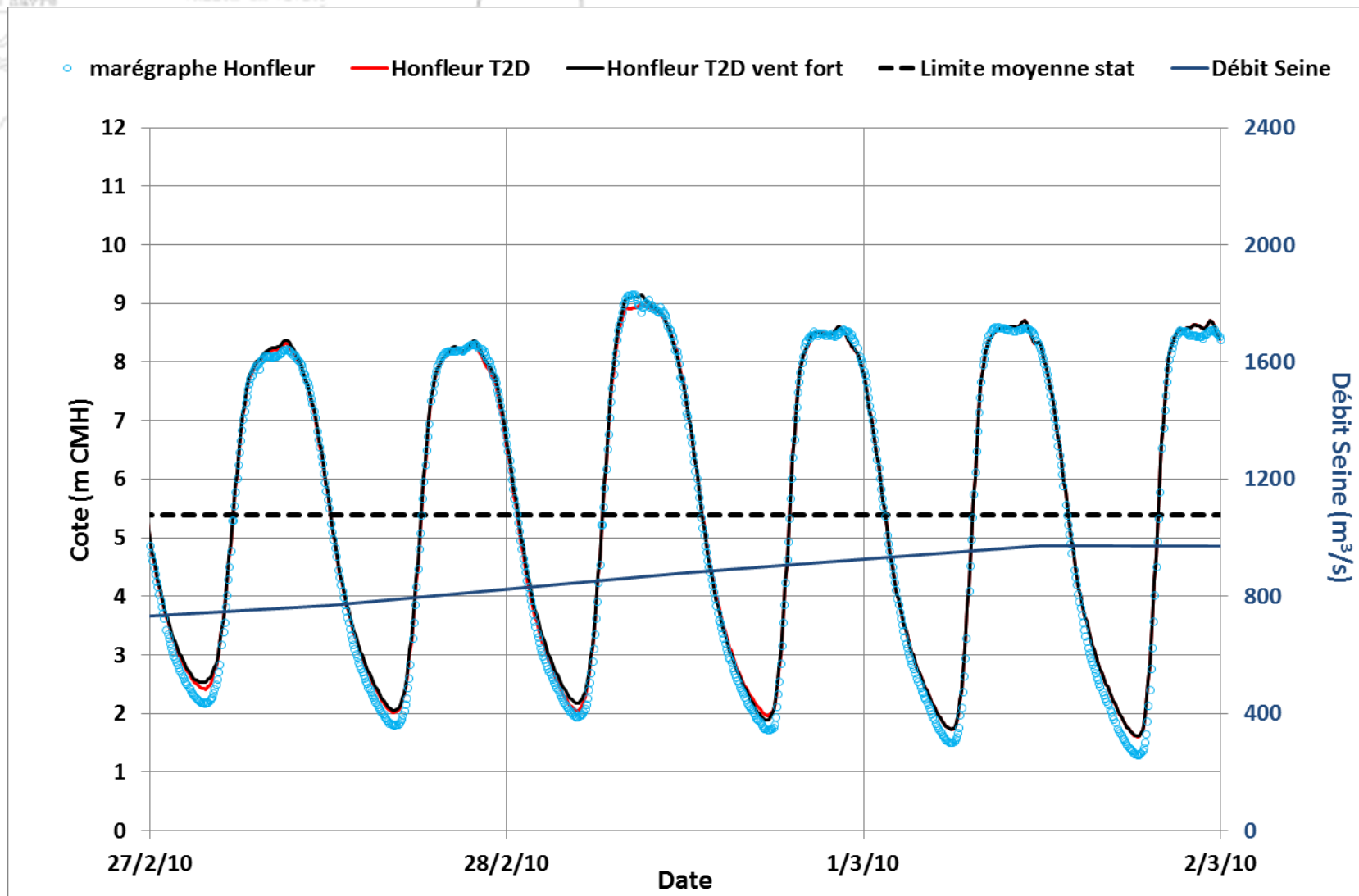


D – Figure 142

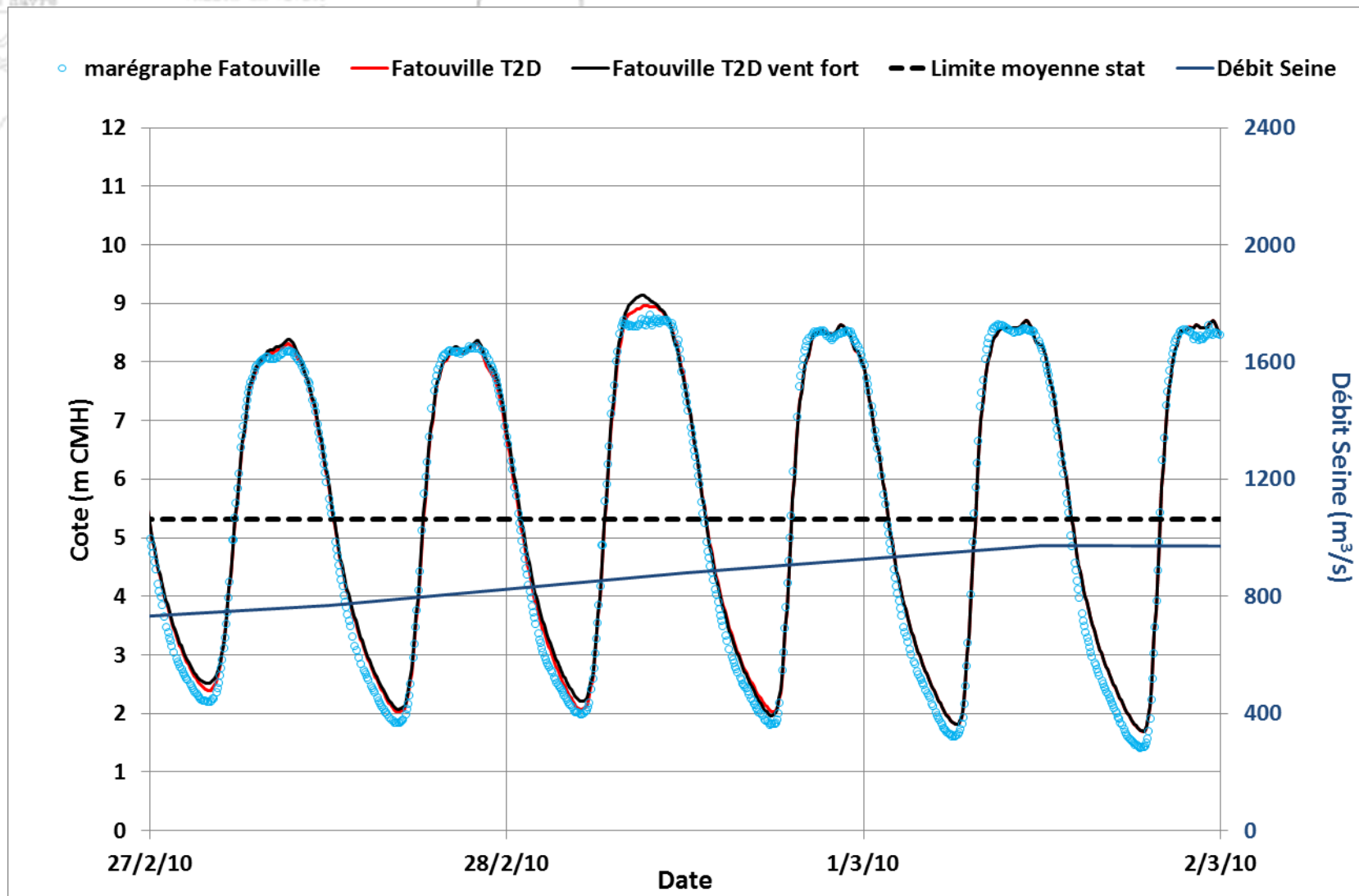
Événement de 2010 : Balise A



Événement de 2010 : Honfleur

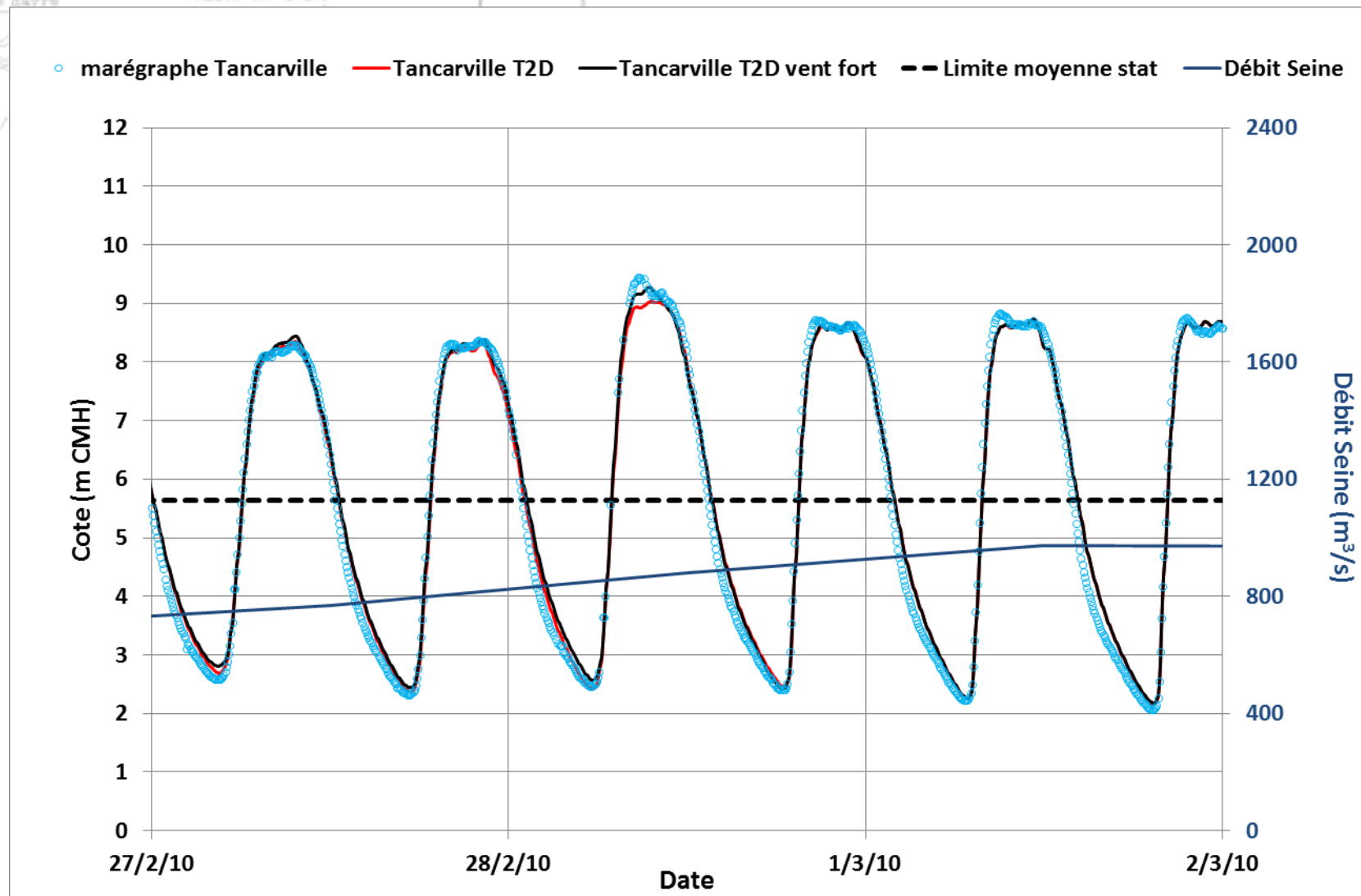


Événement de 2010 : Fatouville

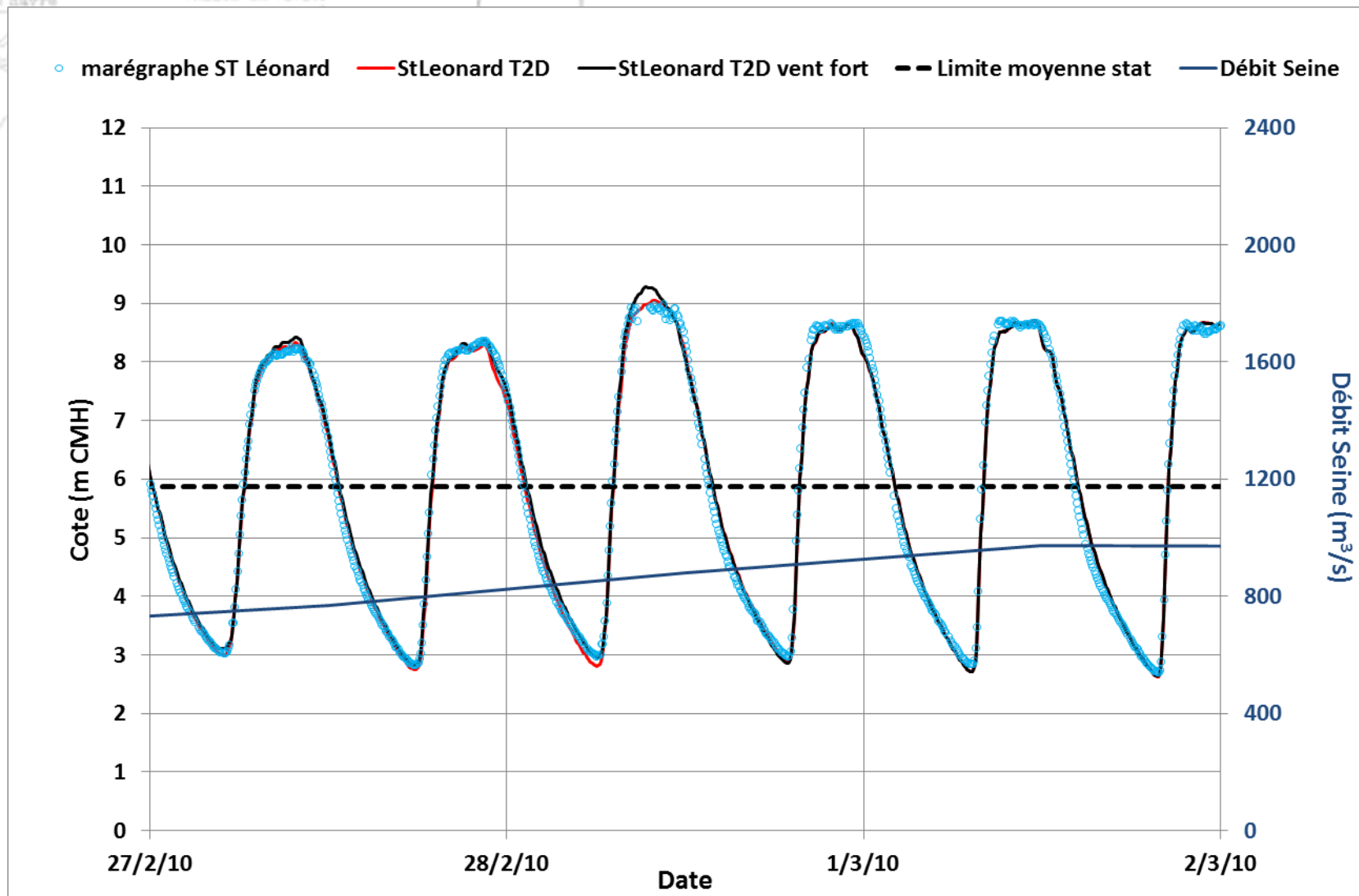


D – Figure 145

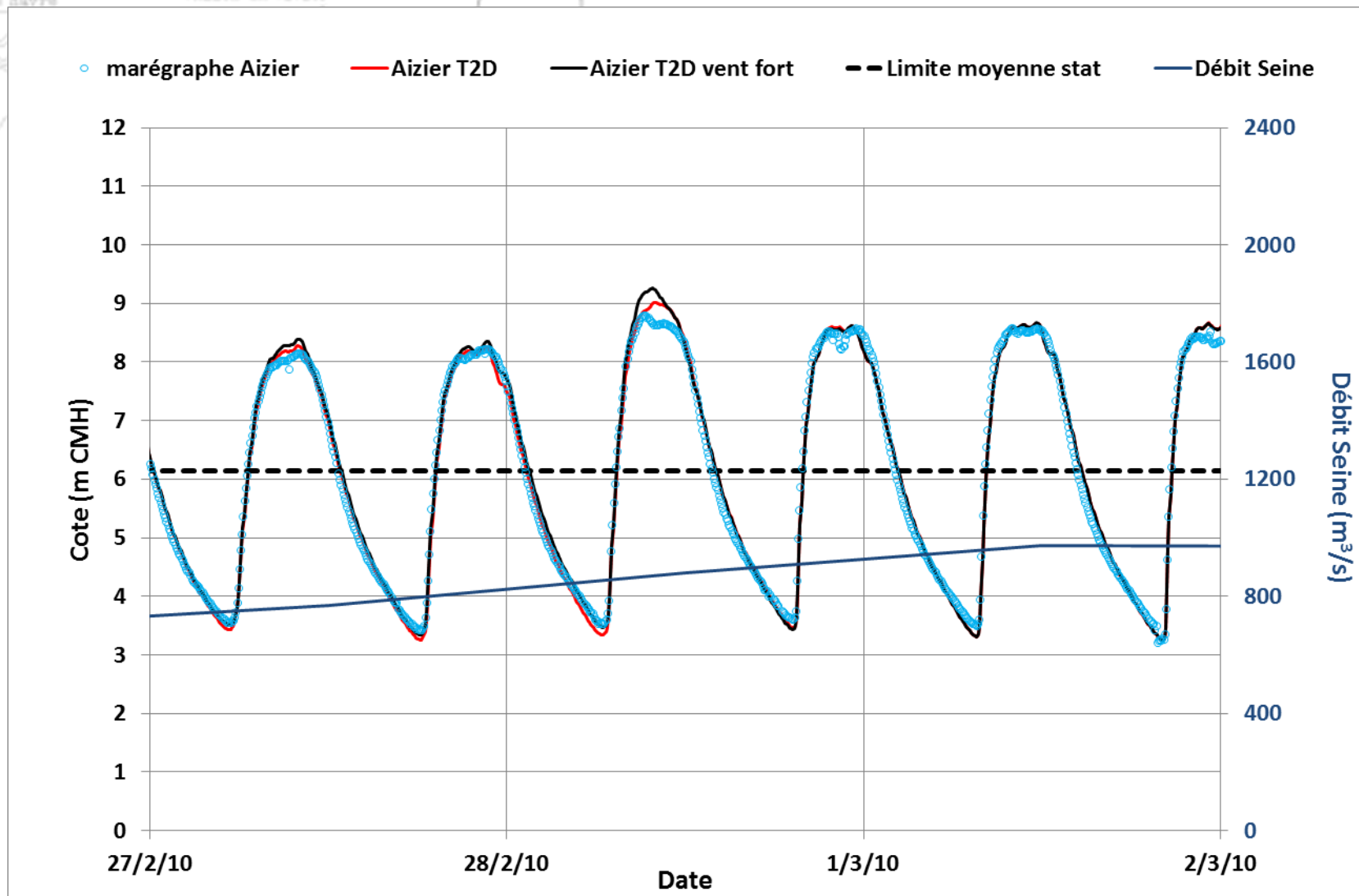
Événement de 2010 : Tancarville



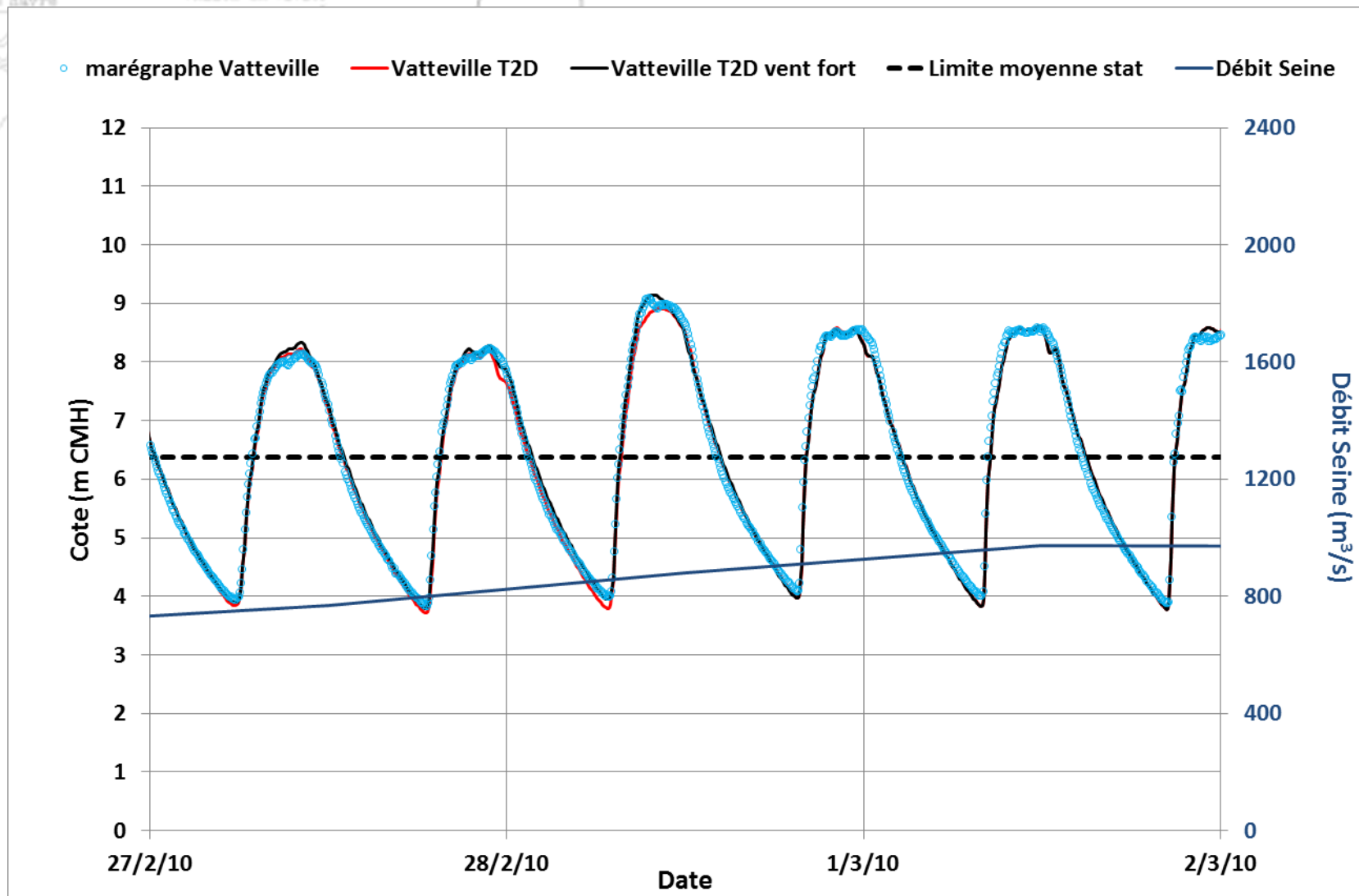
Événement de 2010 : St Léonard



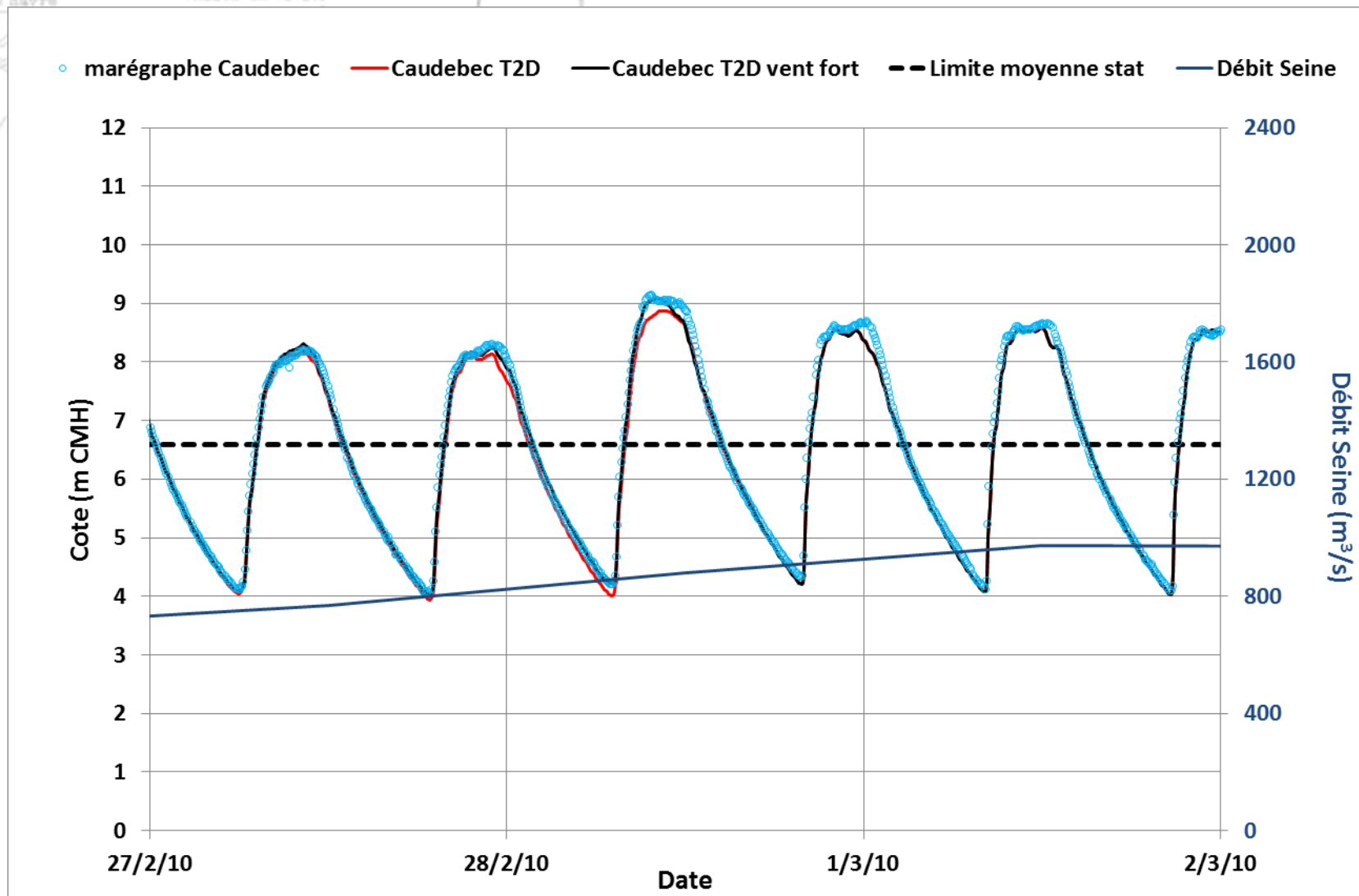
Événement de 2010 : Aizier



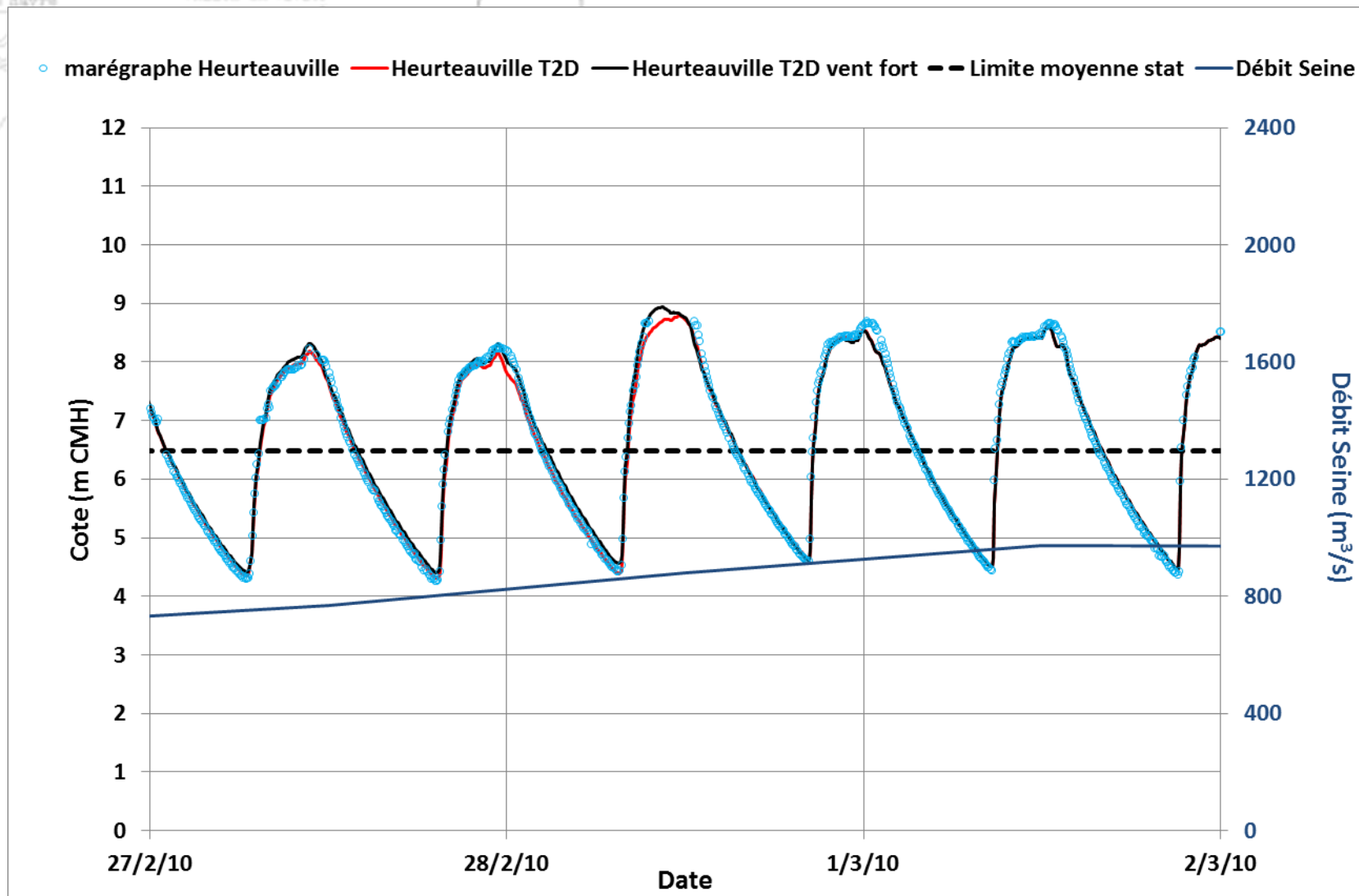
Événement de 2010 : Vatteville



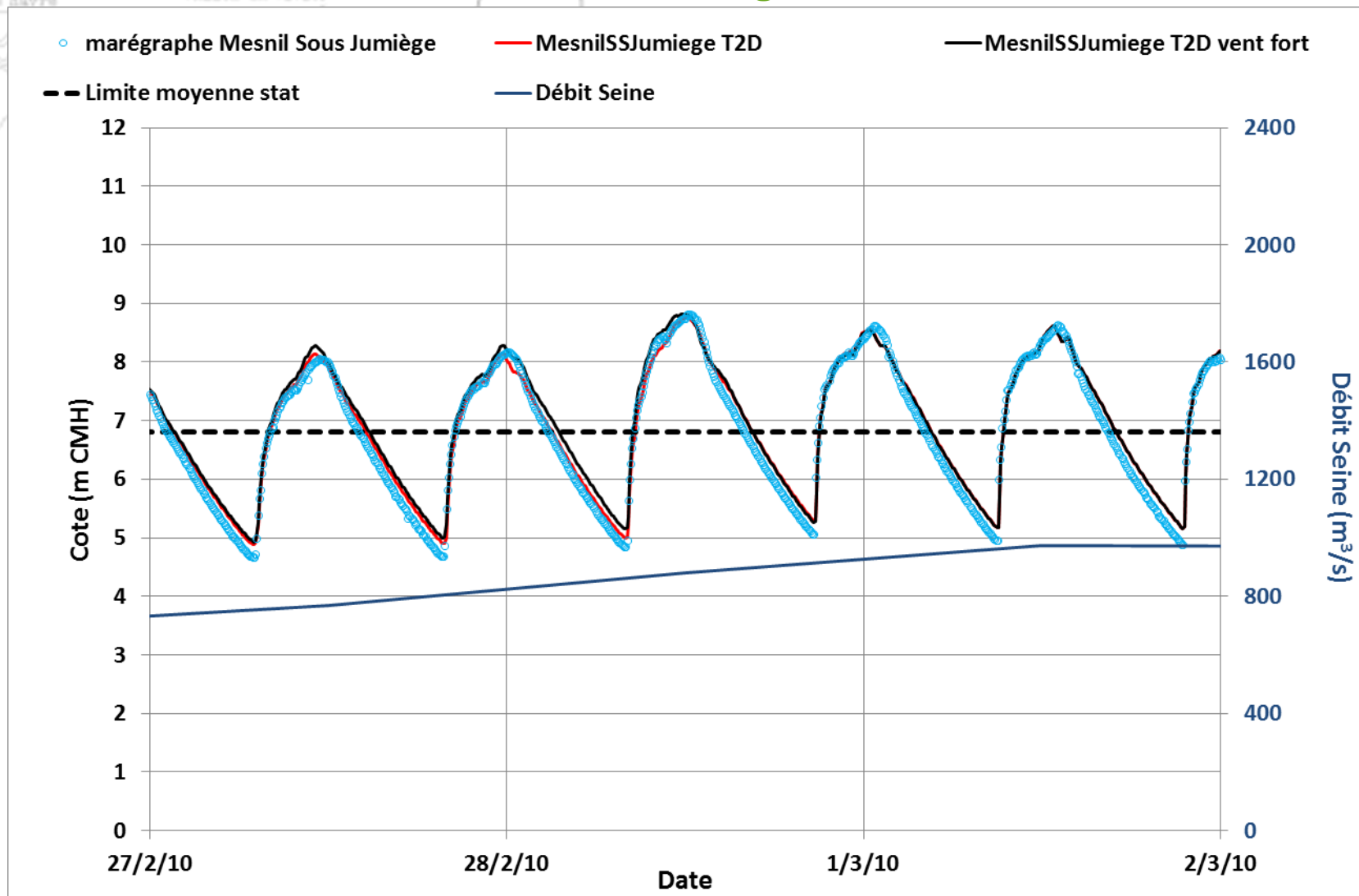
Événement de 2010 : Caudebec



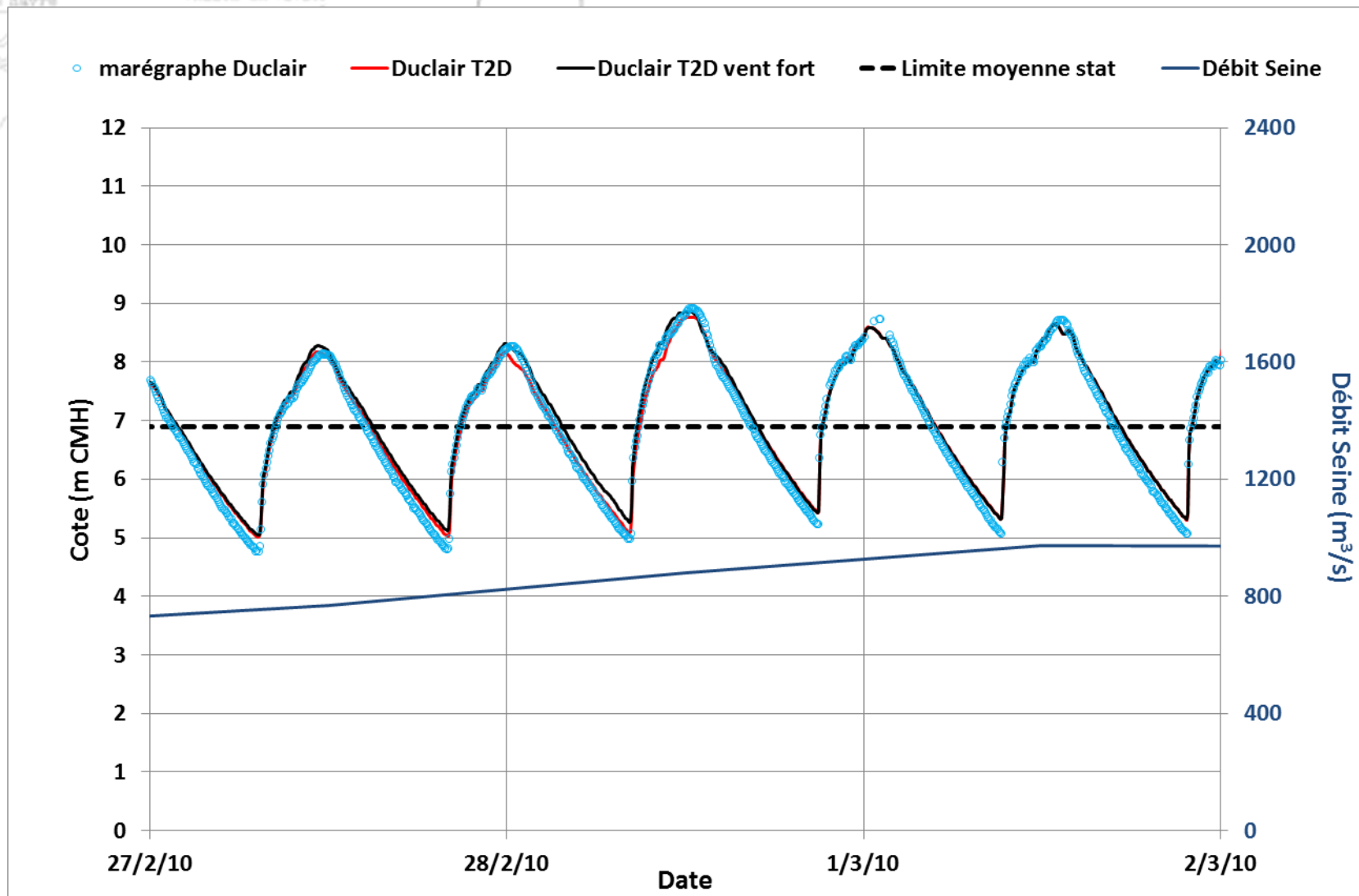
Événement de 2010 : Heurteauville



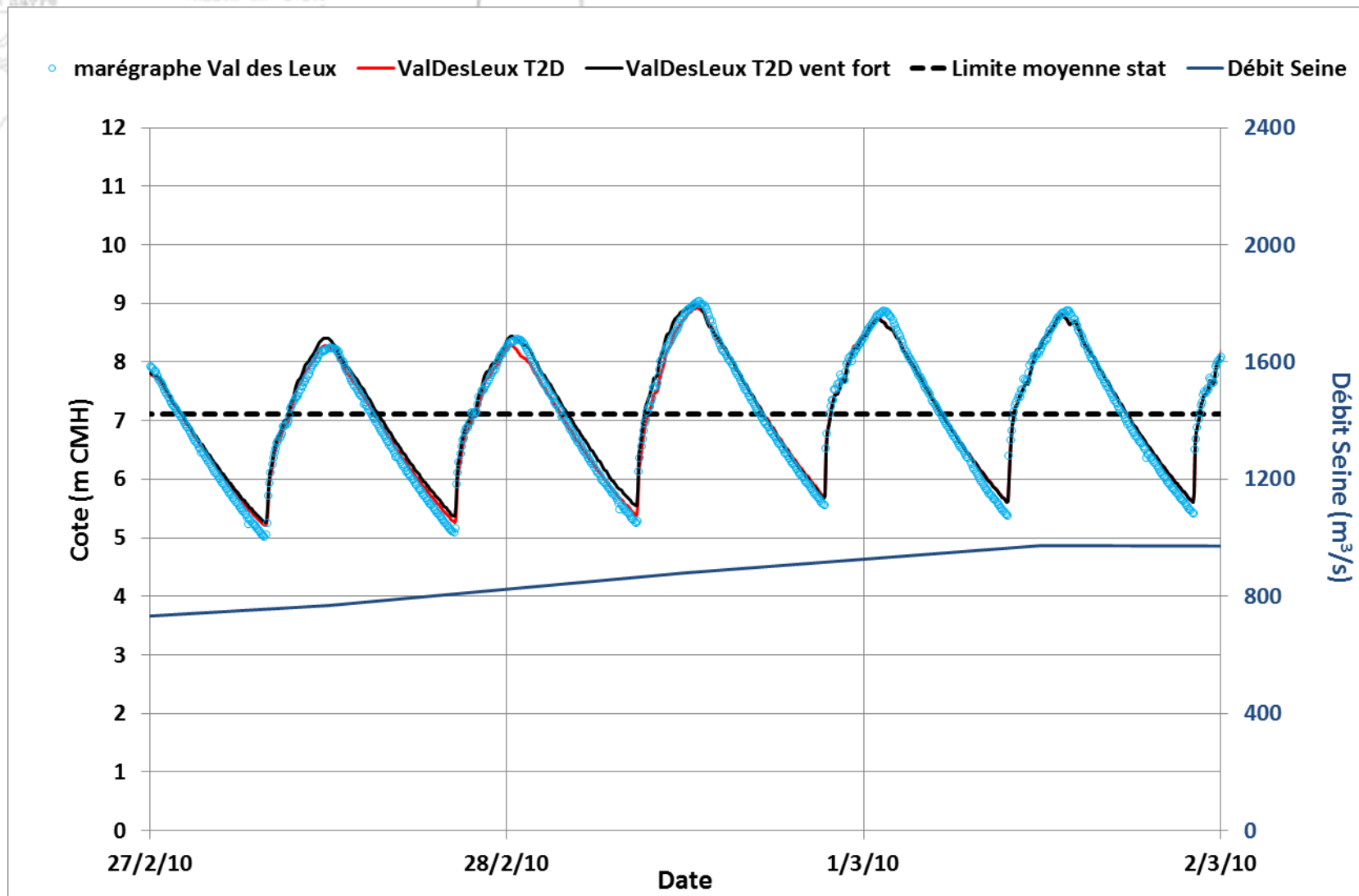
Événement de 2010 : Mesnil-sous-Jumièges



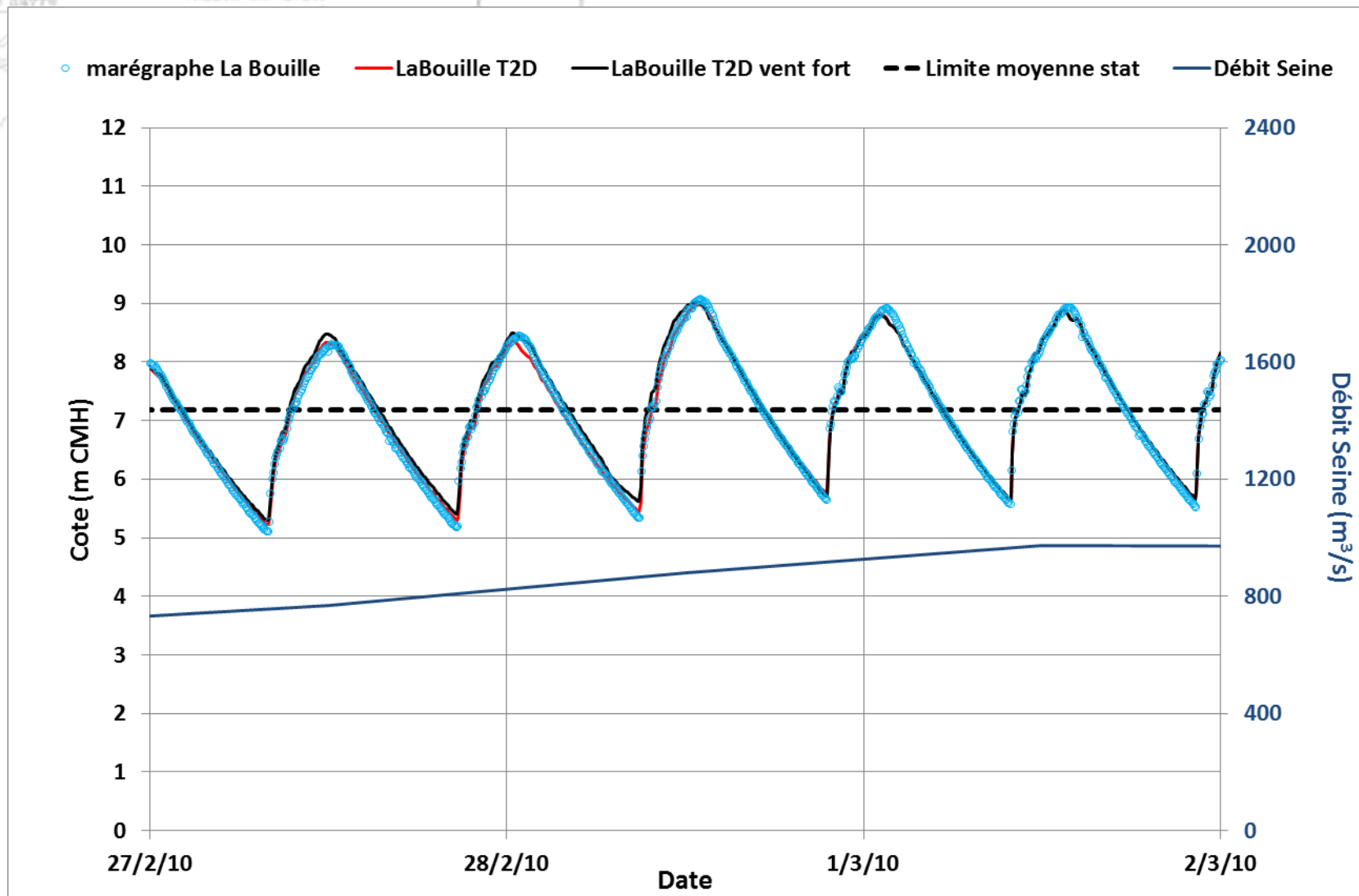
Événement de 2010 : Duclair



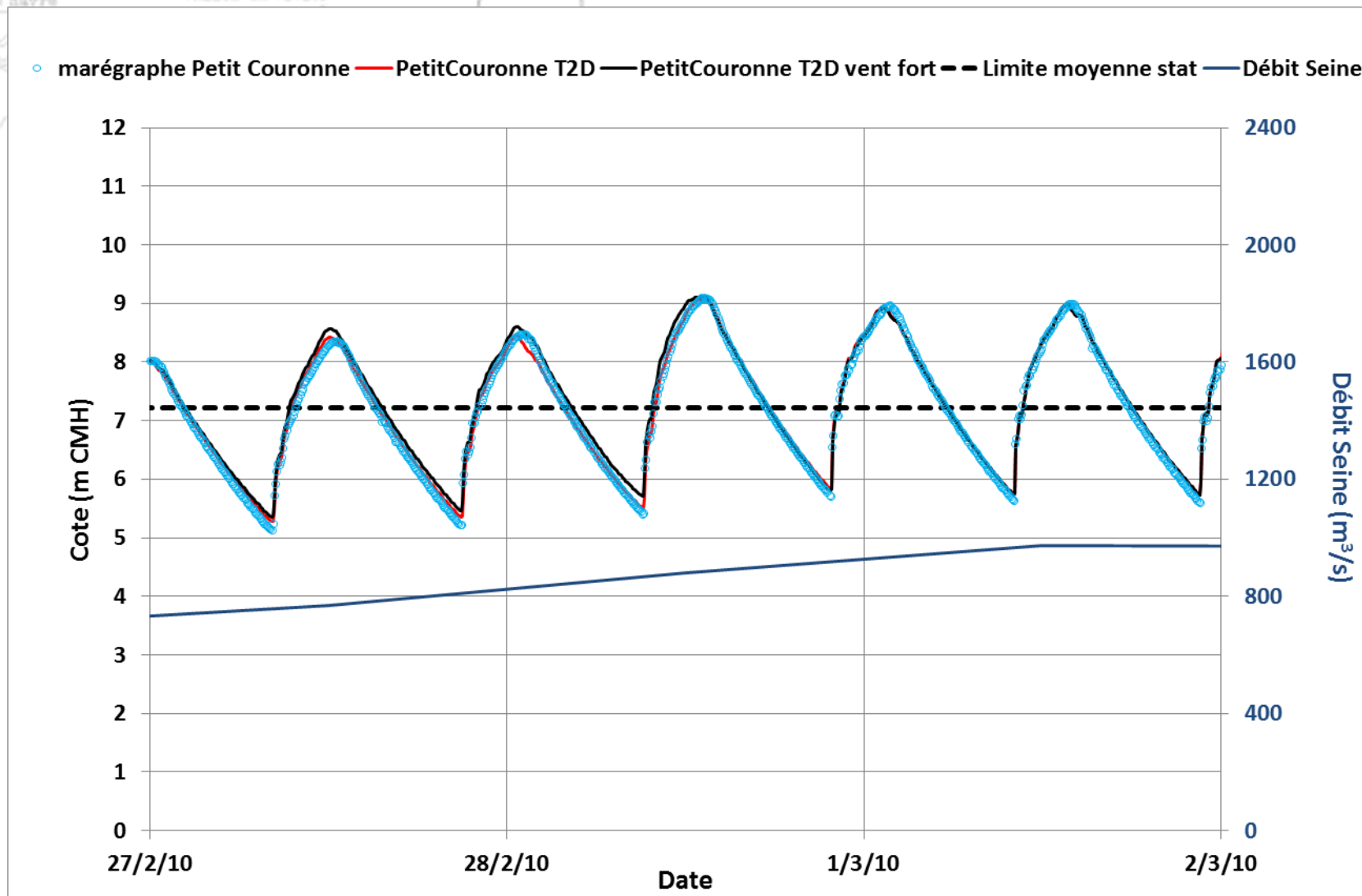
Événement de 2010 : Val-des-Leux



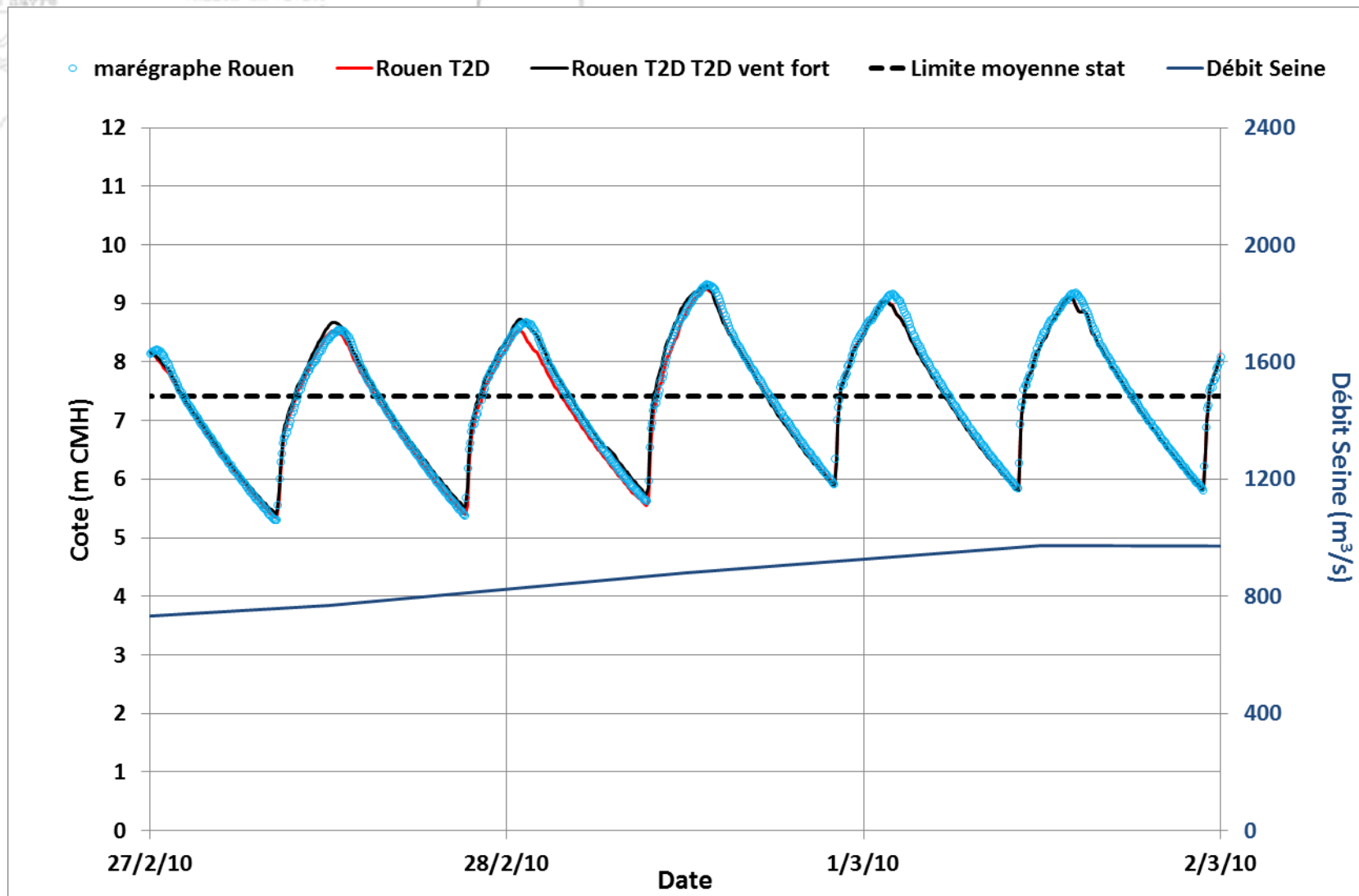
Événement de 2010 : La Bouille



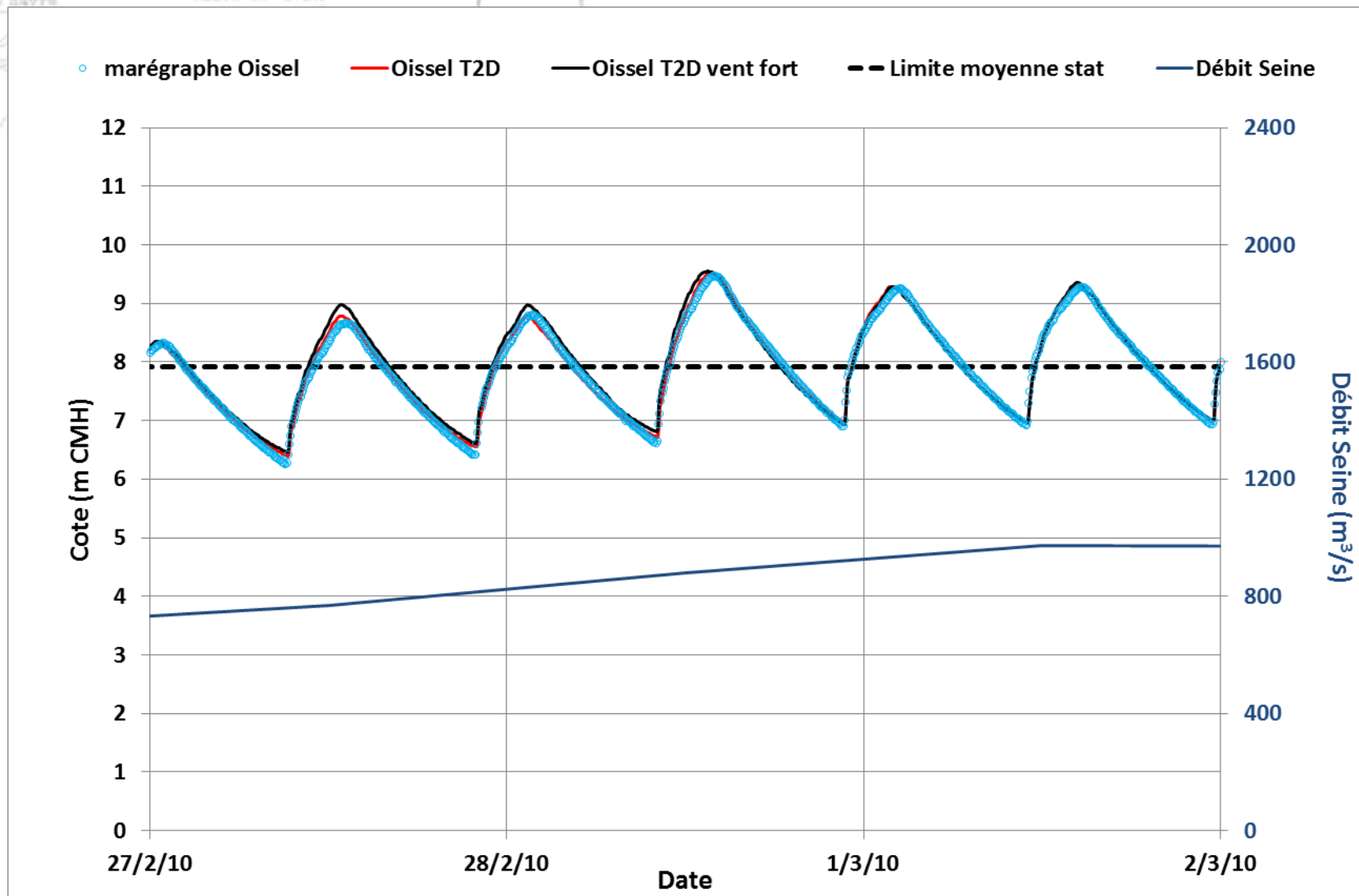
Événement de 2010 : Petit Couronne



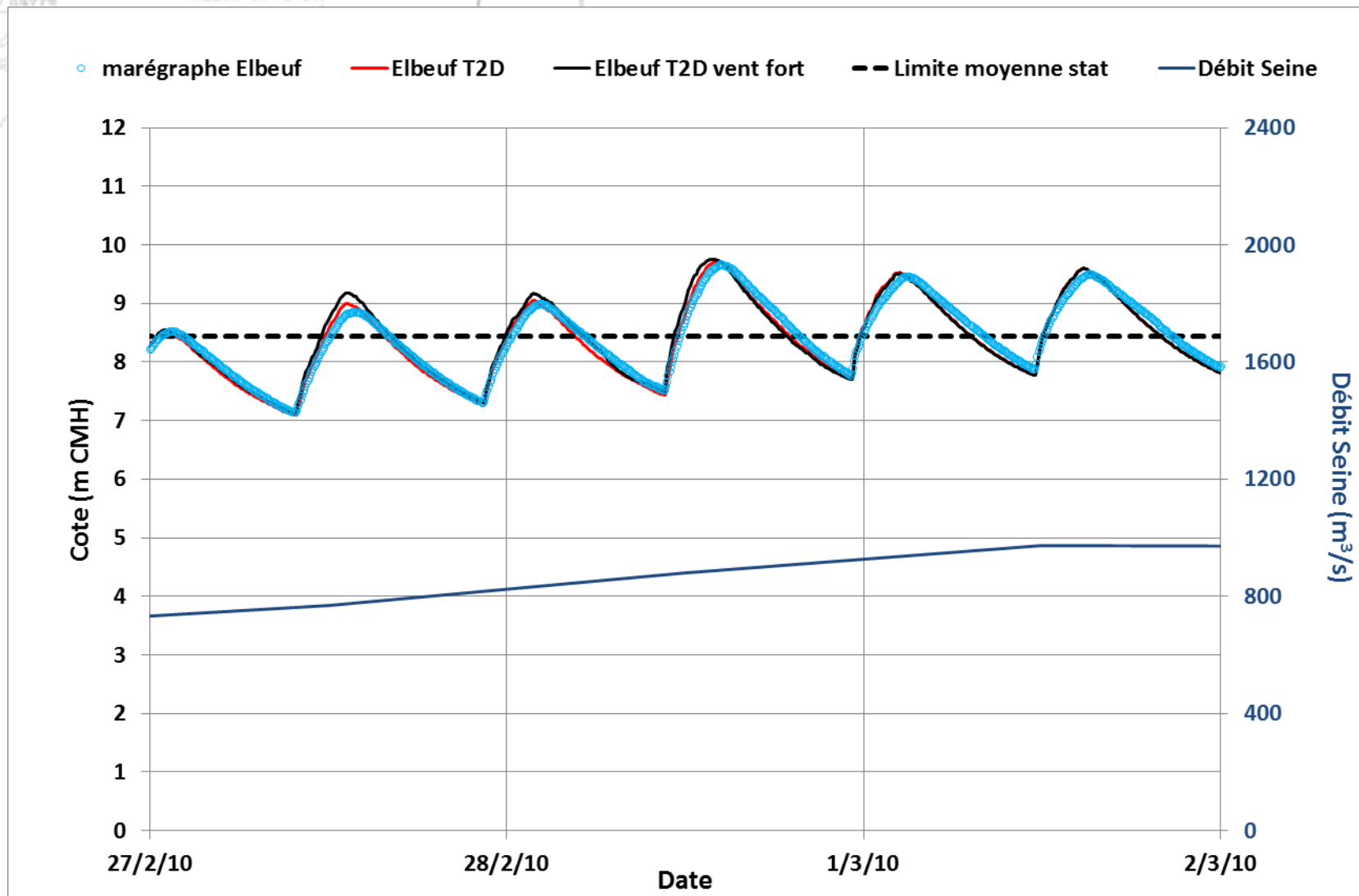
Événement de 2010 : Rouen



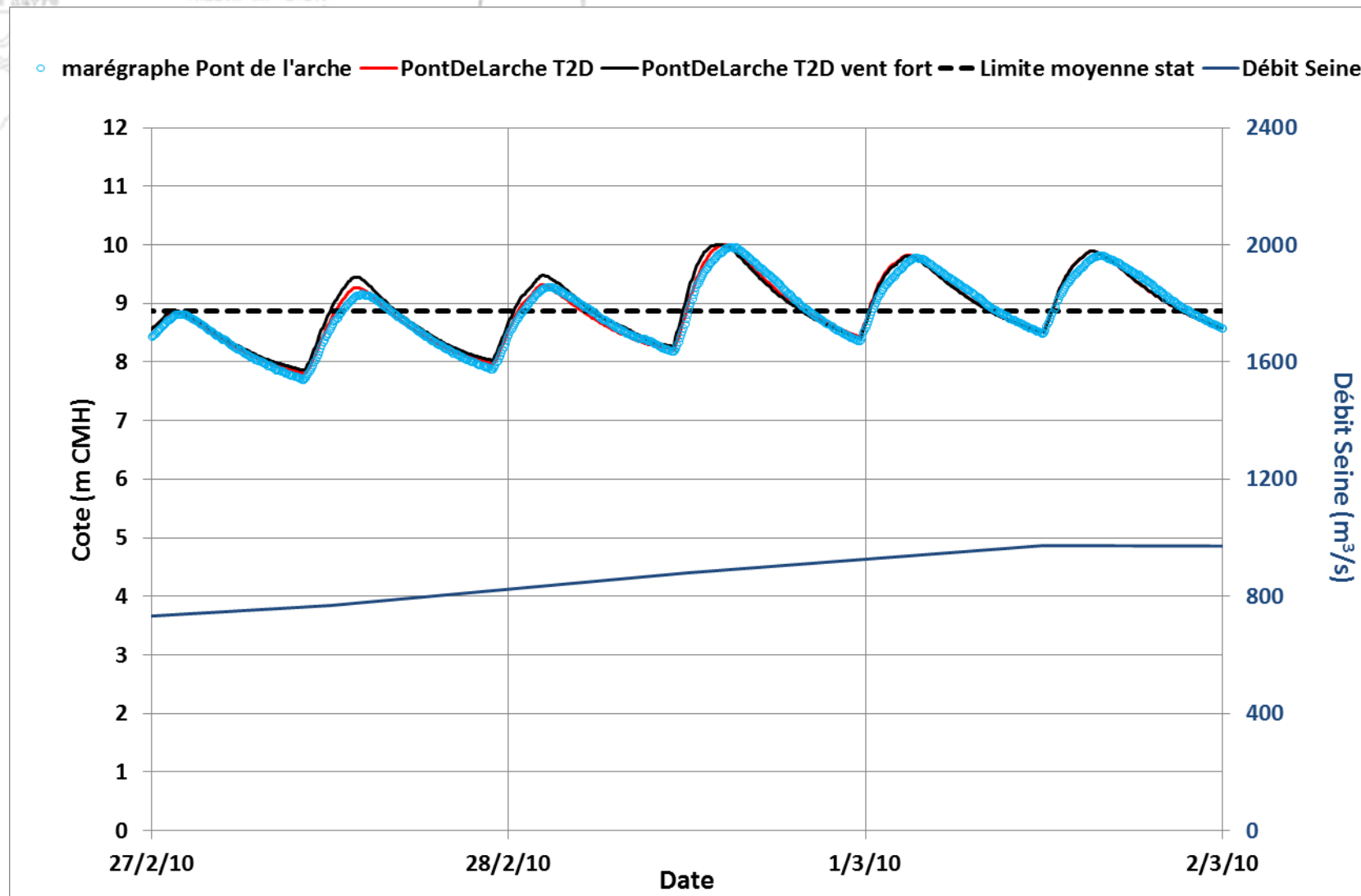
Événement de 2010 : Oissel



Événement de 2010 : Elbeuf



Événement de 2010 : Pont-de-l'Arche



Événement de 2010

