



ÉTUDE HYDRAULIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'YSER

PHASE 2 : MODELISATION

RAPPORT D'ÉTUDE

SEPTEMBRE 2010

N°465 0538

SOMMAIRE

PREAMBULE	1
1. MODELE DE TRANSFORMATION PLUIE-DEBIT DU BASSIN VERSANT DE L'YSER.....	3
1.1. PRESENTATION DU LOGICIEL DE MODELISATION PLUIE-DEBIT PLUTON.....	3
1.2. PRESENTATION DE LA METHODOLOGIE RETENUE POUR LA MODELISATION HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'YSER.....	3
1.2.1. TYPE DE PLUIE.....	4
1.2.2. SATURATION DES SOLS EN EAU	4
1.2.3. VARIATION DE L'OCCUPATION DES SOLS.....	6
1.2.4. OCCURRENCES RETENUES	6
1.2.5. COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT ENVISAGES.....	6
1.3. PLUVIOMETRIE.....	7
1.3.1. PLUVIOMETRIE DE LA ZONE D'ETUDE	7
1.3.2. REPRESENTATION DE LA PLUVIOMETRIE DANS LA MODELISATION	9
1.3.3. PLUIES RETENUES POUR LE CALAGE.....	9
1.4. BASSINS VERSANTS	12
1.4.1. DECOUPAGE EN SOUS-BASSINS VERSANTS.....	12
1.4.2. COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT RETENUS	14
1.4.3. CHOIX DE LA FORMULE DE CALCUL DE TEMPS DE CONCENTRATION.....	21
2. PRESENTATION SUCCINCTE DE LA METHODOLOGIE RETENUE POUR LA MODELISATION HYDROLOGIQUE DES SECTEURS ETUDIES POUR LE RUISSELLEMENT	23
2.1. CHOIX DES SECTEURS RETENUS.....	23
2.1.1. PREAMBULE	23
2.1.2. SOUS BASSIN VERSANT DE LA VLETER BECQUE EN AMONT DE GODEWAERSVELDE.....	23
2.1.3. SOUS BASSIN VERSANT DE L'EY BECQUE EN AMONT DE STEENVOORDE	24
2.2. METHODOLOGIE RETENUE	24
3. MODELISATION HYDRAULIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'YSER.....	25
3.1. ELABORATION DU MODELE DE SIMULATION DES CRUES	25
3.1.1. LE LOGICIEL UTILISE	25
3.1.2. LA TOPOGRAPHIE UTILISEE.....	25
3.1.3. CONSTRUCTION DU MODELE.....	25
3.1.4. CALAGE DU MODELE	28
3.1.5. ANALYSE DES SIMULATIONS DE CALAGE.....	30

3.2. SIMULATIONS DES CRUES DE REFERENCE.....	72
3.2.1. BASSIN VERSANT DE L'YSER.....	73
3.2.2. BASSIN VERSANT DE LA VLETER BECQUE.....	93
4. CARTOGRAPHIE DES CRUES DE REFERENCE	100
ANNEXE 1 : PLUVIOMETRIE JOURNALIERE AUX DIFFERENTES STATIONS EN SEPTEMBRE 2001	101
ANNEXE 2 : HYDROGRAMMES MESURES AUX STATIONS HYDROMETRIQUES DU BASSIN VERSANT DE L'YSER EN SEPTEMBRE 2001	107
ANNEXE 3 : PLUVIOMETRIE JOURNALIERE A BORRE ET SAINT OMER EN NOVEMBRE-DECEMBRE 2009	109
ANNEXE 4 : HYDROGRAMMES MESURES AUX STATIONS HYDROMETRIQUES DU BASSIN VERSANT DE L'YSER EN NOVEMBRE-DECEMBRE 2009	112
ANNEXE 5 : PLUVIOMETRIE JOURNALIERE A BORRE, SAINT OMER, STEENVOORDE ET POPERINGE EN JUILLET 2007	114
ANNEXE 6 : HYDROGRAMMES MESURES AUX STATIONS HYDROMETRIQUES DU BASSIN VERSANT DE L'YSER EN JUILLET 2007	119
ANNEXE 7 : ZONES D'INFLUENCE DES POSTES PLUVIOMETRIQUES DE SAINT OMER, D'ERINGHEM, DE BORRE, DE CASSEL ET DE POPERINGE SUR LE BASSIN VERSANT DE L'YSER	121
ANNEXE 8 : PLUVIOMETRIE JOURNALIERE MESUREE DANS ET AUTOUR DU BASSIN VERSANT DE L'YSER EN SEPTEMBRE 2001	123
ANNEXE 9 : HISTOGRAMMES DES CUMULS DE PLUIE ENREGISTRES ENTRE LE 18 ET LE 21 SEPTEMBRE 2001	125
ANNEXE 10 : ZONES D'INFLUENCE DES POSTES PLUVIOMETRIQUES DE SAINT OMER, DE BORRE ET DE STEENVOORDE SUR LE BASSIN VERSANT DE L'YSER	131
ANNEXE 11 : CARTE DES SOUS-BASSINS VERSANTS	133
ANNEXE 12 : LIMNIGRAMMES MESURES EN BELGIQUE LORS DES CRUES DE SEPTEMBRE 2001 ET DE JUILLET 2007 ..	135
ANNEXE 13 : PLUVIOMETRIE JOURNALIERE A BORRE ET A SAINT OMER EN SEPTEMBRE 2001	138
ANNEXE 14 : HYDROGRAMMES MESURES ET MODELISES AUX STATIONS HYDROMETRIQUES DU BASSIN VERSANT DE L'YSER EN SEPTEMBRE 2001	140
ANNEXE 15 : CARTE DES SOUS-BASSINS VERSANTS ET DES PENTES	145
ANNEXE 16 : HYDROGRAMMES MODELISES PAR PLUTON ET PAR LES PARTENAIRES BELGES DE L'ETUDE EN AMONT DE LA CONFLUENCE ENTRE LA VLETERBEEK ET LA WINTERBEEK EN JUILLET 2007	147
ANNEXE 17 : HYDROGRAMMES MESURES ET MODELISES AUX STATIONS HYDROMETRIQUES DU BASSIN VERSANT DE L'YSER EN JUILLET 2007	149

ANNEXE 18 : CROISEMENT DES DONNEES DE PENTE ET DE SENSIBILITE A LA BATTANCE DES SOLS SUR LE BASSIN VERSANT DE L'YSER	155
ANNEXE 19 : REPARTITION PAR SOUS-BASSIN VERSANT DES ZONES FORESTIERES, URBAINES ET DE PRAIRIES SUR LE BASSIN VERSANT DE L'YSER	157
ANNEXE 20 : CARTOGRAPHIE DU MODELE	159
ANNEXE 21 : SUPERPOSITION DES ZONES INONDEES CALCULEES PAR LE MODELE ET OBSERVEES PAR PHOTOGRAPHIES AERIENNES EN SEPTEMBRE 2001.....	161
ANNEXE 22 : CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDEES CALCULEES PAR LE MODELE SUR LE BASSIN VERSANT DE L'YSER EN JUILLET 2007	163
ANNEXE 23 : CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDEES CALCULEES PAR LE MODELE SUR LE BASSIN VERSANT DE LA VLETER BECQUE EN JUILLET 2007	165
ANNEXE 24 : COEFFICIENTS DE MONTANA CALCULES A LA STATION LILLE LESQUIN.....	167
ANNEXE 25 : CARTES DES ZONES INONDEES POUR LES EVENEMENTS SIMULES	173

oOo

PREAMBULE

Le bassin versant de l'Yser connaît, depuis de nombreuses années, des problèmes récurrents d'inondation. La nature du sol du territoire favorise le ruissellement des eaux et les cours d'eau « gonflent » rapidement. Les aménagements réalisés dans les années 60-70 (rectification, recalibrage...) ont profondément modifié le comportement du fleuve. Plusieurs études ont été entreprises par le passé notamment dans le cadre du Contrat de Rivière de l'Yser. Ainsi, la gestion des inondations s'est organisée autour de plusieurs actions : création de 2 bassins de rétention sur la commune d'Oudezeele, réhabilitation d'un méandre sur la commune d'Herzeele, création d'un réseau de stations hydrométriques sur l'ensemble du bassin versant... Une étude a également été entreprise sur le bassin versant de la Peene Becque (principal affluent de l'Yser) afin de maîtriser les phénomènes de ruissellement et d'érosion des sols.

Depuis novembre 2006, le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) de l'Yser est en phase d'élaboration. La prévention des inondations s'inscrit comme un enjeu fondamental du SAGE de l'Yser. Les premières discussions de la Commission Thématique « Prévention des inondations hydraulique » et de la Commission Locale de l'Eau montrent la volonté des différents acteurs du bassin versant d'agir de façon concrète pour résoudre les dysfonctionnements hydrauliques des cours d'eau du bassin versant. Les dernières inondations de juillet 2007 -survenues sur des secteurs habituellement épargnés - ont encore renforcé cette volonté. Par ailleurs, nos voisins Belges (Région Flamande, Province Flandre Occidentale) sont souvent touchés par les crues de l'Yser et de ses affluents. La Commission Locale de l'Eau a donc délibéré, le 6 novembre 2007, en faveur de la réalisation d'une étude hydraulique sur le bassin versant de l'Yser.

La présente étude hydraulique doit permettre d'aboutir sur un outil décisionnel adapté basé sur l'utilisation du modèle hydraulique, à partir des différentes phases suivantes :

- Phase 1 : Constat, analyse et compréhension de la situation actuelle,
- Phase 2 : Modélisation
- Phase 3 : Simulations d'aménagements,

Les objectifs de l'étude sont d'établir un diagnostic des causes de dysfonctionnements hydrauliques, de cartographier précisément l'ensemble du risque inondation sur le bassin versant de l'Yser, d'effectuer une analyse des enjeux sur le territoire soumis aux aléas et de définir plusieurs scénarios d'aménagements ayant des effets cumulés et complémentaires permettant de réduire les conséquences des crues et des ruissellements dans les zones les plus vulnérables. Les possibilités de réhabilitation du cours naturel de l'Yser, notamment par le reméandrage, seront également étudiées.

Le périmètre de l'étude correspond au périmètre du SAGE de l'Yser. Ce dernier défini par arrêté préfectoral du 8 novembre 2005, comprend 39 communes du département du Nord. Les sous-bassins versants étudiés sont ceux de l'Yser et de ses principaux affluents : l'Ey Becque, la Sale Becque, la Cray Becque, la Vleter Becque, la Zwyne Becque, la Becque d'Houtkerque, la Petite Becque et la Peene Becque.

Le présent rapport de phase 2 correspond aux différentes modélisations hydrologiques et hydrauliques du bassin versant de l'Yser.

oOo

1.

MODELE DE TRANSFORMATION PLUIE-DEBIT DU BASSIN VERSANT DE L'YSER

1.1. PRESENTATION DU LOGICIEL DE MODELISATION PLUIE-DEBIT PLUTON

Le modèle de transformation Pluie-Débit du bassin versant de l'Yser est basé sur le logiciel PLUTON développé par SOGREAH Consultants. PLUTON est un programme permettant la modélisation de la propagation pluie - ruissellement en hydrologie. Il a pour objet le calcul de l'hydrogramme de crue $Q(t)$ de chaque sous-bassin, soit avec calage (pluie et débit connus), soit sans calage sur une pluie statistique pour calculer une crue de temps de retour donné. Les résultats peuvent être repris dans un modèle hydraulique qui simule la propagation des débits fournis par les sous-bassins dans le réseau hydraulique.

Le modèle PLUTON du bassin versant de l'Yser permet de calculer les hydrogrammes pour les exutoires des 37 sous-bassins versants définissant le bassin versant de l'Yser en France, et 5 sous-bassins versants pour la Vleter Becque.

Les hydrogrammes obtenus sont imposés dans le modèle de propagation des écoulements dans les lits de l'Yser et de ses affluents.

1.2. PRESENTATION DE LA METHODOLOGIE RETENUE POUR LA MODELISATION HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'YSER

La modélisation hydrologique va permettre, par l'intermédiaire d'un modèle pluie-débit, de définir les hydrogrammes qui seront utilisés lors de la modélisation hydraulique.

Différents événements seront ainsi définis. Les hydrogrammes résultants seront repris dans le modèle hydraulique. L'objectif sera de tester l'impact de ces événements et de proposer des aménagements dimensionnés pour prémunir un maximum d'enjeux contre un événement précis, qui sera défini en concertation avec le comité de pilotage à l'issue de la phase 2 de l'étude.

L'impact d'un épisode pluviométrique sur les débits et les hydrogrammes restitués au niveau des cours d'eau dépend notamment de quatre paramètres :

- Le type de pluie, qui varie en fonction des saisons.
- L'état de saturation des sols en eau au début de l'épisode pluviométrique qui engendre des inondations.
- Le type d'occupation des sols, qui peut être favorable ou pas.
- L'occurrence, ou période de retour de l'épisode pluviométrique.

La prise en compte de ces quatre critères dans le cadre de la présente étude est expliquée dans les parties qui suivent.

1.2.1. TYPE DE PLUIE

Les types de pluie qui seront considérées pour la modélisation hydrologique sont :

- Une pluie de type hivernal, comparable aux épisodes pluviométriques de novembre 1991, de décembre 1993 – janvier 1994 ou de septembre 2001. Ce type de pluie est de longue durée (plusieurs jours) et d'intensité modérée. La pluie hivernale sera modélisée sur l'ensemble du bassin versant de l'Yser.
- Une pluie orageuse typique de la période estivale, comparable à l'orage ayant touché, en juillet 2007, le secteur de Godewaersvelde notamment. Ce type de pluie est de courte durée (quelques heures) mais de forte intensité. Les cellules orageuses intenses touchent des zones dont la superficie est inférieure au bassin versant de l'Yser. Il ne serait pas réaliste de modéliser ce type d'événement sur l'ensemble du bassin versant. La pluie orageuse sera donc modélisée sur deux secteurs :
 - Le secteur des sous-bassins versant amont de la Peene Becque.
 - Le secteur des sous-bassins versant amont de l'Ey Becque, ainsi que la zone de Godewaersvelde et Boeschepe.

1.2.2. SATURATION DES SOLS EN EAU

1.2.2.1. RAPPELS SUR LES MESURES D'INFILTRATION ET SUR LES CARACTERISTIQUES PEDOLOGIQUES DU SECTEUR D'ETUDE

Lors de la phase 1 de l'étude, des mesures d'infiltration ont été réalisés sur cinq sites du bassin versant de l'Yser. Les sites étaient localisés dans les communes d'Oudezeele, de Cassel et de Godewaersvelde, avec des occupations du sol diverses (cultures, prairies), des pentes variables (moins de 2% à 15%) et différents contextes pédologiques (limons grossiers, argileux, sableux, remblais).

Ces mesures, dans l'ensemble, montrent généralement un retard au ruissellement faible à inexistant, et atteignant parfois 15 minutes. Par ailleurs, la restitution de la pluie en régime permanent est atteinte relativement rapidement, en 15 à 20 minutes sur la quasi-totalité des cas, et en 25 à 30 minutes sur les mesures réalisées en prairie (site n°5). Lorsque le régime permanent est atteint, cela indique que les sols ont atteint l'état de saturation en eau. Cet état de saturation des sols en eau est donc atteint de façon générale en 15 à 20 minutes.

Par ailleurs, le bassin versant est essentiellement composé de sols limono-argileux. Sur ce type de sol, le ressuyage est relativement lent : pour que ces sols retrouvent une légère capacité à emmagasiner de l'eau (3 à 5mm), il est nécessaire d'avoir au moins 24h sans pluie. Le ressuyage complet de ce type de sol n'intervient qu'après 3 à 4 jours de temps sec. Ces valeurs sont indicatives, et sont notamment liées à la teneur en argile dans le sol : plus l'argile est présent, plus le ressuyage est long.

1.2.2.2. HISTORIQUE DES PLUVIOMETRIES MESUREES LORS DES PRINCIPALES CRUES :

Les types d'événements pluviométriques modélisés sont donc la pluie hivernale et l'orage estival. L'analyse de précipitations significatives, tout particulièrement celles de 2001 et de 2007, montrent que les événements pluvieux déclenchant les crues sont toujours précédés d'une pluviométrie dans les heures et les jours précédents.

1.2.2.2.1. *CRUE DE SEPTEMBRE 2001*

Le principal pic de crue a eu lieu le 21/09/2001. Sur la période précédant le pic, on constate que la pluviométrie a été quotidienne sur le bassin versant en septembre 2001. Du 01/09/2001 au 16/09/2001, les cumuls journaliers ont souvent dépassé 10 mm. La pluviométrie s'est ensuite accentuée le 17/09/2001, pour atteindre un cumul dépassant 30mm à Cassel. Cette augmentation de l'intensité des pluies a été à l'origine du premier pic de crue observé le 18/09/2001. Toute cette pluie cumulée a eu pour conséquence de saturer les sols lors des pluies du 19/09/2001 et du 20/09/2001, qui ont engendré le principal pic de crue le 21/09/2001.

La pluviométrie journalière mesurée à Borre, Cassel, Poperinge, Eringhem et Saint Omer en septembre 2001 est fournie en annexe 01.

Les mesures effectuées aux stations hydrométriques de Bambecque, Bollezeele, Ochteele et Steenvoorde en septembre 2001 sont fournies en annexe 02.

1.2.2.2.2. *CRUE DE NOVEMBRE-DECEMBRE 2009*

Le principal pic de crue a eu lieu le 28/11/2009. Sur la période précédant le pic, on constate que la pluviométrie a été quasiment quotidienne sur le mois de novembre (hormis les 18/11/2009 et 19/11/2009). Cette pluviométrie quotidienne, et notamment les fortes pluies du 22/11/2009 et 23/11/2009 (le plus important épisode pluviométrique de novembre 2009, à l'origine du premier pic de crue observé le 24/11/2009), ont contribué à saturer les sols lors des fortes pluies des 25/11/2009, 26/11/2009, 27/11/2009 et 28/11/2009 (épisode pluviométrique à l'origine du principal pic de crue du 28/11/2009).

La pluviométrie journalière mesurée à Borre et Saint Omer en novembre – décembre 2009 est fournie en annexe 03.

Les mesures effectuées aux stations hydrométriques de Bambecque, Ochteele et Steenvoorde (station de Bollezeele en panne) en novembre – décembre 2009 sont fournies en annexe 04.

1.2.2.2.3. *CRUE DE JUILLET 2007*

Le pic de crue a eu lieu le 24/07/2007. Depuis la mi-juillet 2007, la pluviométrie était présente chaque jour sur le bassin versant (hormis les 18/07/2007 et 19/07/2007). Plus particulièrement, deux épisodes pluviométriques importants ont précédé la principale crue. Il s'agit du 16/07/2007 (environ 25 mm enregistré en 24h à Borre et Saint Omer) et du 20/07/2007. L'épisode du 20/07/2007 était un phénomène orageux, avec presque 35 mm enregistré à 24h à Steenvoorde et environ 40 mm à Borre, pour un phénomène d'environ 2h, soit une intensité pluviométrique de l'ordre de 20 mm/h. Ce premier orage a engendré un petit pic de crue (environ 10 m³/s enregistré en débit de pointe à Bambecque) et a contribué à la saturation des sols. Ensuite, chaque jour de faibles cumuls pluviométriques ont été enregistrés jusqu'à l'orage qui s'est abattu dans la nuit du 23 au 24/07/2007. A Steenvoorde et Saint Omer, on observe que cet épisode pluvieux a débuté par une pluie de légère intensité pendant environ 6h, suivie du véritable épisode orageux entre 16h et 21h30 à Saint Omer, et entre 14h et 20h à Steenvoorde (intensité moyenne de 6 mm/h pendant environ 6h). Ainsi, lors de cet orage, les sols étaient saturés en eau du fait des épisodes pluviométriques précédents.

La pluviométrie journalière mesurée à Borre, Saint Omer, Steenvoorde et Poperinge en juillet 2007 est fournie en annexe 05.

Les mesures effectuées aux stations hydrométriques de Bambecque, Bollezeele, Ochteele et Steenvoorde en juillet 2007 sont fournies en annexe 06.

Par conséquent, on peut considérer que lors d'événements pluvieux engendrant des crues, les sols sont déjà saturés en eau et que les coefficients de ruissellement restent donc constants.

1.2.3. VARIATION DE L'OCCUPATION DES SOLS

Dans le cadre de la présente étude, une occupation des sols défavorables à l'infiltration sera considérée. Elle correspond à des zones de labours nus, pour lesquelles le phénomène de battance (phénomène provoqué par l'énergie cinétique des gouttes de pluie qui désagrège les mottes de terre ; les particules fines ainsi libérées s'accumulent en surface et forment une croûte de battance qui se traduit par un colmatage de la porosité du sol) est réel.

Par ailleurs, une occupation des sols favorables à l'infiltration sera également prise en compte. Elle correspond aux zones de cultures sur lesquelles la végétation est développée, et où le phénomène de battance est peu susceptible d'apparaître.

1.2.4. OCCURRENCES RETENUES

Quatre périodes de retour seront prises en compte pour la modélisation hydrologique :

- Période de retour biennal (T = 2 ans).
- Période de retour décennale (T = 10 ans).
- Période de retour vicennale (T = 20 ans).
- Période de retour centennale (T = 100 ans).

1.2.5. COEFFICIENTS DE RUISELLEMENT ENVISAGES

Les coefficients de ruissellement envisagés dans le cadre de la présente étude sont les suivants :

Coefficients de ruissellement - T = 10 ans				
Classe de sols		Pentes		
occupation des sols favorable	occupation des sols défavorable	pente < 1%	1% < pente < 5%	pente > 5%
	Bois, forêt, landes	0.02	0.05	0.10
	Prairies	0.07	0.15	0.30
Cultures en végétation		0.08	0.20	0.35
	Labours nus - battance faible	0.10	0.25	0.40
	Labours nus - battance moyenne	0.15	0.35	0.50
	Labours nus - battance forte	0.20	0.40	0.60
	Habitat rural	0.40	0.40	0.40
	Zone urbaine	0.90	0.90	0.90

Avec application de la formule de transformation classique, on a :

$C_r(2 \text{ ans}) = C_r(10 \text{ ans}) \times 0,90$
$C_r(5 \text{ ans}) = C_r(10 \text{ ans}) \times 0,95$
$C_r(20 \text{ ans}) = C_r(10 \text{ ans}) \times 1,05$
$C_r(100 \text{ ans}) = C_r(10 \text{ ans}) \times 1,20$

1.3. PLUVIOMETRIE

1.3.1. PLUVIOMETRIE DE LA ZONE D'ÉTUDE

Cinq postes pluviométriques ont été pris en compte dans le cadre de l'étude hydrologique du bassin versant de l'Yser : Cassel, Borre, Eringhem, Saint Omer et Poperinge.

Une synthèse des valeurs mesurées aux différentes stations est fournie dans le tableau en page suivante.

Localisation de la station	Chronologie	Nombre d'années considérées	Nombre d'années disponibles	Moyenne du cumul annuel de précipitations (en mm)	Moyenne mensuelle (en mm/mois)	Maximum du cumul mensuel mesuré (en mm)	Mois correspondant	Maximum journalier mesuré (en mm)	Jour correspondant
Borre	1975 - 2008	33	33	738	62	227	décembre 1993	59	août 1996
Cassel	1975 - 1984 et 2001 - 2005	12	14	746	62	207	septembre 2001	56	juillet 1975
Eringhem	1992 - 2005	13	14	767	64	200	décembre 1993	53	août 1996
Saint Omer	1970 - 2008	39	39	766	64	268	décembre 1993	82	juillet 1975
Poperinge	1987 - 2008	20	22	802	67	243	septembre 2001	99	juillet 2005

On constate une certaine homogénéité des moyennes de la pluviométrie annuelle des différents postes, comprises entre 746 et 802 mm, ce qui correspond à des moyennes mensuelles de l'ordre de 65 mm/mois. Ces valeurs de pluviométrie sont relativement faibles par rapport à la pluviométrie généralement observée sur le Nord – Pas de Calais (source : Annuaire 2008 du réseau pluviométrique, DIREN Service de l'Eau, des Milieux Aquatiques et des Risques Naturels, 2008).

Les mois de septembre à décembre sont généralement les plus pluvieux, mais les plus fortes valeurs journalières de pluviométrie sont mesurées en été. Cela traduit la différence entre les deux types de pluie qui engendrent les crues importantes sur le bassin versant :

- Les pluies automnales et hivernales, réparties sur de longues périodes (parfois plus d'un mois) avec des intensités faibles à moyennes (10 à 40 mm/jour). Ces pluies se divisent le plus souvent en une longue période de pluviométrie peu intense (saturation des sols), suivie de quelques jours de pluviométrie dont l'intensité est supérieure, et aux cours desquels les pics de crue sont atteints. Ces phénomènes météorologiques sont vastes, et touchent de façon relativement homogène l'ensemble du bassin versant.
- Les pluies orageuses, qui surviennent le plus souvent en été. Ces pluies sont de courtes durées mais leurs intensités sont fortes (50 à 100 mm/jour). Ces phénomènes météorologiques sont violents, mais leurs emprises sont plus restreintes que dans le cas de pluies hivernales. Ce sont des phénomènes très hétérogènes.

1.3.2. REPRESENTATION DE LA PLUVIOMETRIE DANS LA MODELISATION

Le modèle de transformation Pluie – Débit du bassin versant de l'Yser prend en compte la pluie mesurée sur cinq stations pluviométriques, réparties de façon uniforme et homogène dans et à proximité du bassin versant.

La localisation des ces postes pluviométriques, ainsi que leurs zones d'influence (polygones de Thiessen) est présentée en annexe 07.

1.3.3. PLUIES RETENUES POUR LE CALAGE

Le calage du modèle Pluie – Débit doit être effectué sur la base d'événements connus (pour lesquels on dispose de données pluviométriques et hydrométriques précises), en retenant une pluie significative ayant engendré des inondations, ce qui permet de vérifier que le modèle traduit bien ce qui a pu être observé en réalité. Les événements retenus doivent également être récents. Ainsi, les caractéristiques physiques du bassin versant de l'Yser lors de l'événement considéré correspondent toujours aux conditions actuelles.

1.3.3.1. PLUIE DE TYPE HIVERNAL

1.3.3.1.1. CHOIX DE LA PLUIE DE CALAGE DE TYPE HIVERNAL

Les principales crues hivernales recensées sont les crues de novembre 1991, de décembre 1993 – janvier 1994, septembre 2001, mars 2002 et novembre 2009.

Les événements de 1991 et de 1993 – 1994, bien qu'ayant engendré des crues majeures, ne sont pas retenus pour le calage du modèle car ils ne sont pas jugés suffisamment récents pour refléter les caractéristiques physiques actuelles du bassin versant de l'Yser.

L'ampleur du phénomène de 2002 reste inférieure à ceux de 2001 ou de 2009. En effet, moins de secteurs ont été inondés en 2002 par rapport à 2001 notamment, et le débit de pointe journalier atteint à l'aval du bassin versant (station de Bambecque) est de l'ordre de 30 m³/s, alors que le débit de pointe journalier a dépassé 40 m³/s lors des événements de 2001 et de 2009.

Lors de la pluie de 2001, des données journalières ont été récupérées pour les 5 postes pluviométriques, et des données horaires et au pas de temps à la minute sont disponibles sur les postes de Cassel et d'Eringhem. Par ailleurs, les 4 stations hydrométriques du bassin versant ont bien fonctionné lors de la crue, ce qui permet de vérifier les hydrogrammes restitués par les sous-bassins versant et de caler le modèle Pluie – Débit. A noter également que la crue de 2001 est particulièrement bien connue puisqu'en dehors des nombreux témoignages d'habitants sinistrés recueillis lors de la phase 1 de l'étude, une campagne de photographie aérienne a été effectuée par la DIREN lors des inondations.

Lors de la pluie de 2009, des données pluviométriques sont disponibles uniquement sur les stations de Borre et de Saint Omer. De plus, la station hydrométrique de Bollezeele n'a pas fonctionné lors de la crue.

Par conséquent, l'événement retenu pour le calage du modèle Pluie – Débit dans le cas d'une pluie de type hivernal est l'événement de 2001.

1.3.3.1.2. ANALYSE DE LA PLUIE DE 2001

La crue de septembre 2001 a débuté le 17/09/2001 pour s'achever le 26/09/2001, la crue s'étant principalement fait ressentir entre le 19/09/2001 et le 23/09/2001 (le pic ayant été atteint le 21/09/2001).

Le tableau suivant présente le bilan de la pluviométrie mesurée en septembre 2001 aux différentes stations pluviométriques :

	Station d'Eringhem	Station de Borre	Station de Saint Omer	Station de Cassel	Station de Poperinge
Début de l'épisode pluviométrique	02/09/2001	02/09/2001	02/09/2001	02/09/2001	01/09/2001
Cumul du mois de septembre 2001 (en mm)	155.4	140.4	152.2	206.7	243
Cumul du 18 au 21 septembre 2001 (en mm)	44.8	30.2	41	75.7	112.5

La pluviométrie journalière mesurée dans et autour du bassin versant de l'Yser est fournie en annexe 08.

L'épisode pluviométrique a commencé au même moment sur les différents postes, au début du mois de septembre.

Concernant la période et la durée de la pluie ayant généré le pic de crue, elles sont identiques sur les 5 stations : début le 18 septembre et fin le 21 septembre, soit 4 jours. Cette pluie intense a eu un historique proche sur les différents postes :

- Début de la pluie le 18/09/2001.
- Intensité homogène et observée principalement les 19/09/2001 et 20/09/2001. Seules les stations de Saint Omer et de Poperinge diffèrent légèrement : à Saint Omer la pluie intense a surtout eu lieu les 18/09/2001 et 19/09/2001. A Poperinge, la plus forte intensité a été mesurée le 18/09/2001, suivie d'une accalmie le 19/09/2001, puis de nouveau une hausse de l'intensité le 20/09/2001.
- Fin de la pluie significative le 21/09/2001 sur les 5 stations.

Les histogrammes des cumuls de pluie enregistrés du 18/09/2001 au 21/09/2001 sont fournis en annexe 09.

Les cumuls de pluviométrie, que ce soit à l'échelle du mois ou à l'échelle de la pluie à l'origine du pic de crue, sont très similaires sur les stations de Borre, Eringhem et Saint Omer. On observe des valeurs nettement supérieures à Cassel et à Poperinge.

Le calage fin du modèle Pluie Débit doit être réalisé sur des données horaires au minimum. Pour les événements de septembre 2001, seuls les enregistrements effectués aux stations de Cassel et d'Eringhem offrent cette précision. Compte tenu des observations faites ci-dessus, et de la relative homogénéité des enregistrements sur certaines stations :

- Les valeurs de pluviométrie horaire enregistrées à Eringhem sont pressenties pour être appliquées aux bassins versants sous l'influence des stations de Borre et de Saint Omer. Toutefois, la pluviométrie enregistrée à Saint Omer, où la pluie intense a eu lieu plus tôt qu'ailleurs, pourra être utilisée notamment pour les bassins versants amont de l'Yser.

- Les valeurs de pluviométrie horaire enregistrées à Cassel sont pressenties pour être appliquées aux bassins versants sous l'influence de la station de Poperinge.

1.3.3.2. PLUIE DE TYPE ESTIVAL

1.3.3.2.1. CHOIX DE LA PLUIE DE CALAGE DE TYPE ESTIVAL

Les plus fortes crues estivales, consécutives à des pluies orageuses, ont été recensées en juillet 1980, en août 1996, en juillet 2005 et en juillet 2007 (le plus fort événement orageux recensé sur le bassin versant de l'Yser en France).

Les événements de 1980 et de 1996 ne sont pas retenus puisqu'ils sont jugés trop anciens. C'est finalement l'événement de juillet 2007 qui est retenu pour servir de pluie de calage au modèle Pluie – Débit (événement récent, témoignages recueillis et phénomène particulièrement fort sur le secteur d'étude).

Le calage pourra véritablement être réalisé pour les sous-bassins versants amont de la Peene Becque et de l'Ey Becque, car les débits restitués à l'exutoire pourront être comparés à ce qui a été mesuré aux stations hydrométriques de Steenvoorde (Ey Becque) et d'Ochtezeele (Peene Becque). Un contrôle pourra également être effectué avec les mesures hydrométriques des stations de Bollezeele et de Bambecque (apports de la Sale Becque, du ruisseau d'Houtkerque).

Les données relatives au bassin versant de la Vleter Becque ne pourront être véritablement calées, puisqu'il n'existe pas de station hydrométrique en France, et que la station hydrométrique la plus proche est située à Poperinge en Belgique. Celle-ci ne peut être utilisée car elle n'est pas significative, plusieurs affluents venant se jeter dans la Vleter Becque entre la frontière franco-belge et la commune de Poperinge. Toutefois, dans le cadre de la modélisation hydraulique de la Poperingevaart en Belgique, une modélisation Pluie-Débit a été effectuée sur la Vleterbeek au niveau de la confluence avec la Winterbeek (ce point constitue la condition amont du modèle belge, et la condition aval de la modélisation réalisée dans le cadre de la présente étude). A défaut d'autres données, le calage sera réalisé sur l'hydrogramme issu de l'étude belge.

1.3.3.2.2. ANALYSE DE LA PLUIE DE 2007

La crue de juillet 2007 a débuté le 23/07/2007 pour s'achever le 28/07/2007, le pic ayant été atteint le 24/07/2007.

L'orage du 23-24 juillet 2007 a été précédé d'épisodes pluvieux significatifs en juillet 2007, notamment les 16 et 20 juillet 2007. Par ailleurs, à partir du 20 juillet 2007 (33,8 mm en 3h à Steenvoorde), de la pluie a été observée chaque jour sur le bassin versant.

Lors de l'orage de juillet 2007, les stations de Cassel et d'Eringhem ne fonctionnaient plus (fermeture de ces stations fin 2005). Les stations utilisées dans le modèle Pluie – Débit sont donc celles de Borre, Saint Omer (contrairement à 2001, ces stations ont été modernisées et fournissent des données précises) et Steenvoorde. Les zones d'influence de ces différents postes (polygones de Thiessen) sont définies en annexe 10.

Les valeurs fournies par la station de Poperinge sont journalières, et ne permettent pas d'analyser un événement tel qu'un orage estival, car elles ne sont pas suffisamment fines. On remarque toutefois qu'un cumul journalier de presque 90 mm y a été enregistré entre le 23/07/2007 à 8h et le 24/07/2007 à 8h. Il s'agit du plus fort cumul journalier fourni sur cet événement (sur le même intervalle, le cumul est de 56,9 mm à Steenvoorde, 38,6 mm à Saint Omer et 20 mm à Borre). La cellule orageuse s'est donc principalement localisée sur la zone de Steenvoorde et Poperinge (même si les cumuls enregistrés à Borre et dans une moindre mesure à Saint Omer, sont significatifs). A Steenvoorde et Saint Omer, on observe que cet épisode pluvieux a débuté par une pluie de légère intensité pendant environ 6h (cumul compris

entre 2 et 4 mm), suivie du véritable épisode orageux entre 16h et 21h30 à Saint Omer, et entre 14h et 20h à Steenvoorde (intensité moyenne de 6 mm/h pendant environ 6h). Ainsi, lors de cet orage, les sols étaient saturés en eau du fait des épisodes pluviométriques précédents.

1.4. BASSINS VERSANTS

1.4.1. DECOUPAGE EN SOUS-BASSINS VERSANTS

Le bassin versant de l'Yser a été découpé en une combinaison de sous-bassins versant homogènes pour le modèle de transformation pluie – débit.

La pluie qui est affectée à chaque sous-bassin est déterminée par une combinaison des pluies mesurées sur les pluviomètres du secteur d'étude. Cette combinaison est fonction du rapprochement entre une station pluviométrique donnée et le centre du sous-bassin versant en question. A l'exutoire de chaque sous-bassin versant, l'hydrogramme de crue est calculé à partir de cette pluie.

Il est ensuite possible, en utilisant des temps de transfert entre les différents sous-bassins, de calculer le transfert des différents hydrogrammes vers l'aval. Cette opération consiste à créer des bassins dits « combinés ».

Il a été défini 42 sous-bassins versant dans le modèle Pluton de l'Yser (annexe 11). Chaque sous-bassin versant est caractérisé par des paramètres figés et des paramètres pouvant être ajustés :

- Paramètres figés : pluies de projet, paramètres physiques des sous-bassins versant (surface, pente, longueur du chemin hydraulique).
- Paramètres à ajuster : débits de base, coefficients de ruissellement de chaque sous-bassin versant, formule de temps de concentration utilisée.

Les caractéristiques physiques des différents sous-bassins versants sont les suivantes :

Cours d'eau	Nom du bassin versant	Superficie (en Ha)	Longueur du chemin hydraulique (en m)	Pente moyenne (en %)
Yser	Y01	1 521	6 270	0.41
	Y02	992	5 800	0.52
	Y03	1 032	3 140	0.70
	Y04	1 690	5 320	0.45
	Y05	2 869	11 690	0.28
	Y06	698	5 730	0.43
	Y07	445	3 090	0.65
	Y08	602	3 030	0.50
	Y09	394	5 870	0.26
	Y10	894	6 120	0.25
	Y11	102	2 410	0.23
Peene Becque	PB01	2 265	8 010	0.34
	PB02	1 336	8 550	0.52
	PB03	1 219	5 290	0.57
	PB04	51	1 660	2.05
	PB05	395	4 130	1.16
	PB06	201	3 070	1.60
	PB07	586	3 650	1.16
	PB08	590	5 480	0.81
	PB09	1 184	6 485	0.73
	PB10	980	6 020	0.82
	PB11	1 112	7 280	0.26
Cray Becque	C01	812	4 480	0.41
Sale Becque	S01	845	7 040	1.99
	S02	910	7 170	2.02
	S03	260	3 240	0.59
	S04	915	9 210	0.22
Petite Becque	p01	457	6 670	0.25
Ruisseau d'Houtkerque	H01	2 108	9 740	0.42
	H02	576	5 480	0.38
Ey Becque	E01	1 062	5 820	0.65
	E02	1 067	6 450	0.67
	E03	132	1 960	1.02
	E04	1 303	5 870	0.78
	E05	4 320	10 930	0.42
	E06	1 172	8 520	0.31
Zwyne Becque	Z01	1 049	7 890	0.23
Vleter Becque	V01	496	4 310	1.81
	V02	261	2 710	0.77
	V03	360	2 990	3.21
	V04	129	1 760	2.22
	V05	379	4 320	1.20

1.4.2. COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT RETENUS

1.4.2.1. CALAGE HYDROLOGIQUE – IMPACT DES ECLUSES DE NIEUWPOORT

Les limnigrammes mesurés lors des crues de septembre 2001 et de juillet 2007 (fournis en annexe 12) sur l'ensemble des stations belges montrent l'impact des ouvertures et des fermetures des écluses de Nieuwpoort de façon évidente jusqu'à Woumen, et de façon plus relative jusqu'à Lo Fintele.

Les partenaires belges nous ont informés que peu de crédit est apporté en phase de décrue à la courbe de tarage de la station de Roesbrugge (directement à l'aval de la frontière franco-belge). Ceci serait dû à la capacité d'écoulement réduite de l'Yser à la mer. Des investigations sont en cours sur cette station pour prendre en compte le problème et corriger les débits lors des phases de décrue, qui semblent surestimés. Toutefois à ce jour les partenaires belges valident uniquement les informations fournies à partir de la courbe de tarage de la station hydrométrique de Roesbrugge.

1.4.2.2. ÉVÉNEMENTS DE SEPTEMBRE 2001

1.4.2.2.1. OBSERVATION DES LIMNIGRAMMES EN BELGIQUE

Sur les limnigrammes fournis en annexe 12, on distingue aisément les oscillations caractéristiques des cycles d'ouverture et de fermeture des écluses de Nieuwpoort jusqu'à la station de Lo-Fintele. Sur les limnigrammes mesurés à Roesbrugge, ces oscillations sont invisibles durant la montée de crue. On observe par ailleurs que la durée de décrue semble particulièrement importante, ce qui corrobore les éléments avancés par les partenaires belges au sujet de l'analyse faite sur la station de Roesbrugge. Par ailleurs, lors de la décrue en juillet 2007, on distingue de très légères oscillations sur le limnigramme. Ainsi, si les écluses de Nieuwpoort n'ont apparemment pas d'influence sur la montée et le pic de crue, il n'est pas sûr qu'il en aille de même pour la décrue.

Cette situation implique que si le pic de crue est correct pour le calage, les volumes peuvent être surestimés lors de la décrue du fait de l'influence aval. À noter que dans le cadre de notre étude, et donc des aménagements et protections à mettre en place, c'est le pic de crue qui est primordial pour déterminer les hauteurs d'eau.

1.4.2.2.2. PERIODE DE RETOUR DE L'ÉVÉNEMENT DE CALAGE

L'intensité pluviométrique lors des événements de septembre 2001, sur le bassin versant de l'Yser en France, est la suivante :

- Poste d'Eringhem : entre le 16/09/2001 à 18h30 et le 20/09/2001 à 19h30, 65,7 mm ont été mesurés, soit une intensité pluviométrique moyenne de 0,68 mm/h pendant 97 heures.
- Poste de Cassel : entre le 17/09/2001 à 4h et le 21/09/2001 à 13h, 112,1 mm ont été mesurés, soit une intensité pluviométrique moyenne de 1,09 mm/h pendant 103 heures.

En utilisant la formule de Montana et les coefficients a et b de la station de Lille Lesquin, on constate qu'il s'agit d'une pluie d'occurrence vicennale sur le bassin versant de l'Yser en France, notamment à la station de Cassel. Les coefficients de ruissellement hivernaux de période de retour vicennale ont donc été utilisés.

1.4.2.2.3. MODELE PLUTON POUR LA CRUE DE SEPTEMBRE 2001

A. Généralités sur le calage hydrologique

La modélisation hydrologique (réalisée avec le logiciel Pluton) ne prend pas en compte les phénomènes d'écroulement et de stockage. Ces phénomènes sont pris en compte dans le modèle hydraulique (réalisée avec le logiciel CARIMA). Ainsi, pour que le calage hydrologique soit définitif, des modélisations hydrologiques et hydrauliques croisées ont été nécessaires.

Le calage hydrologique s'effectue notamment au regard des volumes de crue cumulés, mais également en comparant les pics de crue. Toutefois, si les débits maximums atteints sont indicatifs, les phénomènes d'écroulement ne sont pas pris en compte. Une donnée intéressante pour le calage hydrologique reste donc les volumes de crue cumulés, cette donnée ne variera pas lors de la modélisation hydraulique.

B. Analyse des hydrogrammes

a) Cas particulier de la station hydrométrique de Bollezeele

Concernant l'hydrogramme mesuré à Bollezeele, qui correspond au bassin versant amont de l'Yser, les résultats obtenus ne sont pas satisfaisants. En effet, les bassins versants correspondants sont sous l'influence croisée des postes pluviométriques d'Eringhem et de Saint Omer. Pour ce dernier, les données fournies par la DREAL ne sont que journalières, ce qui n'est pas suffisamment précis pour que ces données soient retenues dans le modèle Pluton. En revanche, l'observation de ces données journalières (voir annexe 13) montrent, lors de la principale pluie à l'origine de la crue, que la pluie a été beaucoup plus forte à Saint Omer les 17/09/2001 et 18/09/2001, tandis qu'elle a été au contraire beaucoup plus faible le 20/09/2001.

Ainsi, l'utilisation unique du poste pluviométrique d'Eringhem n'est pas cohérente. Mêmes en intégrant les données de Saint Omer pour les bassins versants amonts de l'Yser, il n'est pas possible d'effectuer le calage hydrologique sur la station de Bollezeele. Par conséquent, lors de la réunion du 2 juillet 2010 en comité technique restreint, il a été convenu que l'hydrogramme mesuré à Bollezeele soit directement retenu dans le modèle hydraulique pour le calage.

Pour la suite de l'étude, les apports en ce point ont été déterminés en extrapolant les critères de détermination des coefficients de ruissellement du reste de la zone d'étude sur le bassin versant au niveau de la station de Bollezeele.

b) Analyse des autres hydrogrammes

Les hydrogrammes mesurés et modélisés, ainsi que les volumes cumulés, sont présentés sous forme de graphiques en annexe 14 pour les stations d'Ochtezeele, de Steenvoorde, de Bambecque et de Roesbrugge (condition aval du modèle hydraulique).

La modélisation Pluie-Débit de la pluie de septembre 2001 donne les résultats suivants (en lien avec l'annexe 14) :

Stations hydrométriques	Débit au pic de crue (en m ³ /s)		Volume total cumulé en m ³			Volume de la montée en crue en m ³		
	mesuré	modélisé	mesuré	modélisé	écart	mesuré	modélisé	écart
Ochtezeele	16.52	22.23	3 286 927	2 678 434	23%	1 930 014	2 081 454	-7%
Steenveerde	5.78	8.90	836 676	818 017	2%	567 931	636 966	-11%
Bambecque	43.14	54.43	12 584 986	8 219 353	53%	6 653 278	6 309 659	5%
Roesbrugge	70.00	88.60	19 575 059	14 186 220	38%	9 977 332	10 639 846	-6%

En dehors de la station de Steenvoorde, les écarts obtenus entre les volumes cumulés mesurés et modélisés traduisent bien le phénomène de défaut d'évacuation de l'Yser à la mer lors de la décrue. En effet, les écarts restent importants sur les volumes cumulés totaux, tandis qu'ils sont cohérents pour les volumes cumulés de montée en crue (volume entre la base et le pic de l'hydrogramme).

Par ailleurs, pour combler l'écart entre les volumes totaux mesurés et modélisés, il serait nécessaire de retenir des coefficients de ruissellement très élevés, ce qui ne correspondraient

pas avec la réalité du terrain. En outre, les débits maximums obtenus seraient beaucoup trop élevés.

Ces constatations faites sur les hydrogrammes, ainsi que les informations fournies par les belges et l'absence de données traduisant de façon satisfaisante les débits mesurés en décrue, nous ont poussé à effectuer le calage hydrologique sur les volumes de montée en crue. Le calage s'est également effectué avec une attention particulière sur le pic de crue qui a été obtenu in fine, après intégration des hydrogrammes dans le modèle hydraulique. En effet, le pic de crue est une donnée primordiale qui correspond aux débits maximums et aux hauteurs d'eau maximums, et qui correspond donc à la phase la plus critique de la crue contre laquelle il conviendra de se prémunir.

c) Cas particulier du bassin versant de la Vleter Becque

Sur le bassin versant de la Vleter Becque étudié, il n'y a aucune station hydrométrique. La seule donnée sur laquelle il est envisageable de caler le modèle est le résultat issu d'une modélisation hydrologique réalisée par les partenaires belges de l'étude, et plus précisément en amont de la confluence entre la Vleterbeek et la Winterbeek.

Toutefois, cette modélisation, pour les événements de 2001, est principalement basée sur la pluviométrie mesurée à Beitem (situé à 30 km à l'est de Poperinge). En effet, en septembre 2001 les données issues de Poperinge sont journalières et la station de Vlamertinge n'a pas fonctionné.

Pour la présente modélisation, le choix a été fait de retenir la pluviométrie mesurée à Cassel. En effet, cette station est beaucoup plus proche. Par ailleurs le recours à la pluviométrie de Beitem donne des hydrogrammes qui conduisent, lors de l'intégration dans le modèle hydraulique, à l'inondation d'une partie de Godewaersvelde, alors qu'aucune inondation n'a été observée dans le centre-village à cette période (source : mairie de Godewaersvelde).

Ainsi, la modélisation Pluie-Débit de septembre 2001 sur le bassin versant de la Vleter Becque n'a pas été calée sur l'hydrogramme fourni par les partenaires belges, car la donnée pluviométrique d'entrée n'est pas la même.

1.4.2.2.4. *DETERMINATION DES COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT POUR L'ÉVÉNEMENT DE CALAGE*

Lors du calage du modèle Pluie-Débit, il est apparu que les coefficients de ruissellement envisagés pour la pluie hivernale sont insuffisants. En effet, pour caler le modèle Pluie-Débit, il a été nécessaire d'appliquer un coefficient égal à 1,2 aux coefficients de ruissellement théoriques.

Par ailleurs, il est apparu que les coefficients de ruissellement étaient sous-estimés sur les bassins versants compacts, qui comportent par ailleurs des versants dont la pente est significative. En effet, sur ces bassins versants compacts, la longueur du chemin hydraulique conduit à retenir une pente moyenne du bassin versant qui traduit mal la présence des versants pentus. Ce constat est beaucoup plus relatif sur les bassins versant allongés (cas des bassins versants amont de la Sale Becque).

L'annexe 15 est une carte qui présente les pentes du bassin versant, ainsi que le découpage en sous-bassins versants. Les sous-bassins versants concernés par le paragraphe précédent sont :

- Sous-bassins versants avec des versants dont les pentes sont autour de 5% : Y01, Y02, Y03, PB03, PB10 et E05. Pour ces sous-bassins versants, le coefficient de ruissellement a été augmenté de 20 à 25%, hormis pour PB03 où l'augmentation a été de 15%.

- Sous-bassins versants avec des versants dont les pentes sont autour de 10% : PB01 et PB02. Pour ces sous-bassins versants, le coefficient de ruissellement a été augmenté de 40%.

Enfin, lors de l'intégration des résultats du modèle hydrologique dans le modèle hydraulique, et dans le but d'atteindre des pics de crue cohérents avec les mesures effectuées aux stations hydrométriques, l'ensemble des coefficients de ruissellement du bassin versant ont été augmentés de 5%.

Au final, les coefficients de ruissellement retenus sont les suivants :

Cours d'eau	Nom du bassin versant	Coefficients de ruissellement retenus
Yser	Y01	0.36
	Y02	0.39
	Y03	0.37
	Y04	0.27
	Y05	0.32
	Y06	0.27
	Y07	0.25
	Y08	0.29
	Y09	0.29
	Y10	0.26
	Y11	0.22
Peene Becque	PB01	0.43
	PB02	0.40
	PB03	0.32
	PB04	0.53
	PB05	0.54
	PB06	0.51
	PB07	0.54
	PB08	0.28
	PB09	0.27
	PB10	0.32
	PB11	0.39
Cray Becque	C01	0.30
Sale Becque	S01	0.51
	S02	0.44
	S03	0.26
	S04	0.30
Petite Becque	p01	0.26
Ruisseau d'Houtkerque	H01	0.22
	H02	0.24
Ey Becque	E01	0.30
	E02	0.24
	E03	0.78
	E04	0.29
	E05	0.34
	E06	0.24
Zwyne Becque	Z01	0.29

1.4.2.3. ÉVÉNEMENTS DE JUILLET 2007

1.4.2.3.1. BASSIN VERSANT DE LA VLETER BECQUE

Sur le bassin versant de la Vleter Becque étudié, il n'y a aucune station hydrométrique. La seule donnée sur laquelle il est envisageable de caler le modèle est le résultat issu d'une modélisation hydrologique réalisée par les partenaires belges de l'étude, et plus précisément en amont de la confluence entre la Vleterbeek et la Winterbeek.

Pour les événements de juillet 2007, la donnée pluviométrique utilisée par les partenaires belges pour la modélisation hydrologique est issue des mesures effectuées aux stations pluviométriques de Poperinge et d'Ypres.

Cette pluviométrie a donc été retenue pour la présente modélisation, et on y observe bien le double passage de la cellule orageuse retranscrit dans les témoignages des riverains de la Vleter Becque.

A. Période de retour de l'événement de calage

Le 23 juillet 2007, entre 18h et 20h, un cumul de 42,7 mm a été enregistré, soit une intensité pluviométrique de 14,2 mm/h pendant 3h. En utilisant la formule de Montana et les coefficients a et b de la station de Lille Lesquin, on constate qu'il s'agit d'une pluie d'occurrence presque centennale sur le bassin versant de la Vleter Becque en France. Ce sont donc des coefficients de ruissellement estivaux de période de retour centennale qui sont a priori retenus.

B. Modèle PLUTON pour la crue de juillet 2007

Les hydrogrammes modélisés d'une part par les partenaires belges et d'autre part dans le cadre de la présente étude, en amont de la confluence entre la Vleterbeek et de la Winterbeek, sont fournis en annexe 16. On obtient les résultats suivants :

	Débit au pic de crue (en m ³ /s)	Volume total cumulé en m ³
Résultats de la modélisation hydrologique belge	19.82	868 093
Résultats de la présente modélisation hydrologique	30.37	854 224
Ecart	35%	-2%

C. Détermination des coefficients de ruissellement pour l'événement de calage

Lors du calage du modèle Pluie-Débit, il est apparu que les coefficients de ruissellement envisagés pour une pluie estivale aussi intense qu'en 2007 sont insuffisants. Il semble qu'un phénomène de battance soit mal pris en compte. En effet, lors d'une pluie très intense, la protection qu'offrent les cultures en végétation pour le sol paraît insuffisante pour empêcher la formation d'une croûte de battance. De façon à prendre en compte ce phénomène, ce sont les coefficients de ruissellement hivernaux qui ont été utilisés.

La démarche liée aux pentes appliquée au bassin versant de l'Yser a également été utilisée pour la Vleter Becque.

Au final, les coefficients de ruissellement retenus sont les suivants :

Cours d'eau	Nom du bassin versant	Coefficients de ruissellement retenus
Vleiter Becque	V01	0.68
	V02	0.38
	V03	0.48
	V04	0.81
	V05	0.66

1.4.2.3.2. BASSIN VERSANT DE L'YSER

Le calage hydrologique est réalisé selon la même méthode que celle présentée pour les événements de septembre 2001, avec pour le bassin versant de l'Yser un calage en volume réalisé sur la montée en crue.

A. Période de retour de l'événement de calage

Le 23 juillet 2007, entre 17h et 23h, un cumul de 37,9 mm a été mesuré à la station pluviométrique de Steenvoorde, soit une intensité pluviométrique de 6,32 mm/h pendant 6 heures. En utilisant la formule de Montana et les coefficients a et b de la station de Lille Lesquin, on constate qu'il s'agit d'une pluie d'occurrence vicennale sur le bassin versant de l'Yser en France. Ce sont donc des coefficients de ruissellement estivaux de période de retour vicennale qui sont a priori retenus.

Toutefois, il faut noter que les événements de juillet 2007 sont liés à une cellule orageuse. Ce type d'événement météorologique se caractérise par une importante variabilité spatiale de l'intensité pluviométrique. Lors de l'orage du 23 juillet 2007, les plus fortes pluies sont tombées au sud et au sud-est du mont Cassel. Le secteur le plus touché par cet orage en France était situé autour de la commune de Godewaersvelde.

B. Modèle PLUTON pour la crue de juillet 2007

Les hydrogrammes mesurés et modélisés, ainsi que les volumes cumulés, sont présentés sous forme de graphiques en annexe 17 pour les stations d'Ochtezeele, de Steenvoorde, de Bambecque et de Roesbrugge (condition aval du modèle hydraulique).

La modélisation Pluie-Débit de la pluie de septembre 2001 donne les résultats suivants (en lien avec l'annexe 17) :

Stations hydrométriques	Débit au pic de crue (en m ³ /s)		Volume total cumulé en m ³			Volume de la montée en crue en m ³		
	mesuré	modélisé	mesuré	modélisé	écart	mesuré	modélisé	écart
Bollezeele	4.62	4.94	554 360	286 553	-93%	123 129	124 923	1%
Ochtezeele	15.10	19.32	1 441 754	1 122 004	-28%	458 139	399 481	-15%
Steenveerde	8.15	8.97	614 357	491 220	-25%	233 018	242 609	4%
Bambecque	32.80	41.22	6 637 776	3 171 722	-109%	2 139 767	1 279 996	-67%
Roesbrugge	55.09	75.04	13 630 574	5 373 614	-154%	4 524 145	2 246 212	-101%

Les comparaisons entre les volumes mesurés et modélisés lors de la montée en crue montrent qu'un calage satisfaisant est atteint pour les stations hydrométriques en amont, c'est-à dire Bollezeele, Ochtezeele et Steenvoorde.

En revanche, le calage en volume n'est pas satisfaisant pour les stations de Bambecque et de Roesbrugge. Toutefois, compte tenu des données pluviométriques disponibles, pour atteindre les volumes mesurés à ces deux stations, il serait nécessaire de retenir des coefficients de ruissellement élevés sur l'ensemble du bassin versant de l'Yser, alors que la précipitation très intense n'est tombée que sur une partie du bassin versant.

Retenir de tels coefficients de ruissellement aboutit également à des débits très élevés lors du pic de crue, et l'écrêtement obtenu lors de la modélisation hydraulique ne permet pas d'obtenir les débits maximums mesurés : ceux-ci restent très supérieurs à la réalité.

Par conséquent, et de façon à rester cohérent avec les débits maximums mesurés (et donc avec les hauteurs d'eau maximums atteintes), le calage en volume lors de la modélisation Pluie-Débit n'a pas été retenu pour les stations de Bambecque et de Roesbrugge. Ce choix est cohérent avec l'objectif de l'étude, il est également lié au caractère hétérogène des orages cité précédemment.

C. Détermination des coefficients de ruissellement pour l'événement de calage

Les mêmes hypothèses que celles établies dans le cas de la pluie de 2001 ont été reprises pour les sous-bassins versants Y01, Y02, Y03, PB01, PB02, PB03, PB10 et E05.

Par ailleurs, les événements de juillet 2007 sont liés à une cellule orageuse. Ce type d'événement météorologique se caractérise par une importante variabilité spatiale de l'intensité pluviométrique. Par conséquent, le type de coefficient de ruissellement retenu varie en fonction de la localisation des bassins versants par rapport à la cellule orageuse. Ainsi :

- Des coefficients de ruissellement hivernaux de période de retour 100 ans ont été retenus pour les bassins versants amonts de l'Ey Becque E01, E02, E03 et E04.
- Des coefficients de ruissellement hivernaux de période de retour 20 ans ont été retenus pour les bassins versants du ruisseau d'Houtkerque (H01 et H02), sur la zone médiane de l'Ey Becque (E05) et sur les bassins versants amonts de la Peene Becque (PB01, PB02 et PB03).
- Des coefficients de ruissellement estivaux de période de retour 20 ans, auxquels a été appliqué un facteur de 1,4, ont été retenus pour l'amont de l'Yser : Y01, Y02 et Y03.
- Pour le reste du bassin versant, ce sont des coefficients de ruissellement estivaux de période de retour 20 ans auxquels a été appliqué un facteur 1,2 qui ont été retenus.

Au final, les coefficients de ruissellement retenus sont les suivants :

Cours d'eau	Nom du bassin versant	Coefficients de ruissellement retenus
Yser	Y01	0.17
	Y02	0.21
	Y03	0.19
	Y04	0.12
	Y05	0.18
	Y06	0.13
	Y07	0.12
	Y08	0.16
	Y09	0.16
	Y10	0.13
	Y11	0.11
Peene Becque	PB01	0.41
	PB02	0.38
	PB03	0.30
	PB04	0.27
	PB05	0.31
	PB06	0.28
	PB07	0.30
	PB08	0.15
	PB09	0.14
	PB10	0.13
	PB11	0.26
Cray Becque	C01	0.16
Sale Becque	S01	0.27
	S02	0.29
	S03	0.12
	S04	0.17
Petite Becque	p01	0.18
Ruisseau d'Houtkerque	H01	0.21
	H02	0.23
Ey Becque	E01	0.33
	E02	0.27
	E03	0.85
	E04	0.33
	E05	0.32
	E06	0.13
Zwyne Becque	Z01	0.15

1.4.3. CHOIX DE LA FORMULE DE CALCUL DE TEMPS DE CONCENTRATION

Le débit décennal de l'Yser à la station de Bambecque a été calculé à l'aide de la formule rationnelle, en utilisant différentes formules de calcul du temps de concentration. Les résultats obtenus ont été comparés à la valeur fournie par la Banque Hydro à la station de Bambecque :

	Q ₁₀ fourni par la Banque HYDRO en m ³ /s	Q ₁₀ fourni par la formule rationnelle en m ³ /s								
		Turraza	Kirpich	Johnstone et Cross	Passini	Ventura – Passini	SOGREAH	SOGREAH 2	Dujardin	Giandotti
L'Yser à Bambecque	40 [36 ; 47]	18,9	56	31	21,7	1,6	39	41,6	36,2	39,4

On constate, par les différents résultats obtenus, que les formules de calcul du temps de concentration les mieux adaptées au bassin versant de l'Yser sont les suivantes :

- SOGREAH 2
- Giandotti
- SOGREAH
- Et dans une moindre mesure la formule de Dujardin.

oOo

2. PRESENTATION SUCCINCTE DE LA METHODOLOGIE RETENUE POUR LA MODELISATION HYDROLOGIQUE DES SECTEURS ETUDIES POUR LE RUISSELLEMENT

2.1. CHOIX DES SECTEURS RETENUS

Les commentaires fournis ci-dessous à propos du choix des secteurs retenus sont illustrés par les cartes fournies en annexes 18 et 19.

2.1.1. PREAMBULE

Sur le bassin versant de l'Yser, l'occupation des sols est relativement homogène dans l'ensemble. Les sols du bassin versant de l'Yser sont également, dans l'ensemble, sensibles à la battance. En revanche, on constate que les pentes sont plus fortes dans le sud du bassin versant de l'Yser (secteur des monts des Flandres). Par ailleurs, c'est dans ces zones que sont observés la plupart des dysfonctionnements liés au ruissellement. C'est également dans ces zones que les observations stéréoscopiques des photographies aériennes ont permis de recenser le plus de traces d'érosion.

Les zones qui seront étudiées spécifiquement pour la problématique ruissellement sont donc localisées dans le sud du bassin versant de l'Yser.

Le bassin versant de la Peene Becque, ayant déjà fait l'objet d'une étude spécifique (SOGETI, 2005), il ne sera pas étudié dans le cadre de la présente étude.

L'importance des événements passés ont permis de mettre en évidence des zones plus problématiques que sur le reste du bassin versant vis-à-vis du ruissellement : les communes de Steenvoorde et de Godewaersvelde.

2.1.2. SOUS BASSIN VERSANT DE LA VLETER BECQUE EN AMONT DE GODEWAERSVELDE

Le choix du sous-bassin versant de la Vleter Becque à Godewaersvelde a été notamment orienté par les événements de juillet 2007.

En effet, d'importants ruissellement ont été constatés sur ce sous-bassin versant, notamment en juillet 2007, avec pour conséquence de fortes inondations dans le centre-ville de Godewaersvelde. Par ailleurs, on constate que des pentes très fortes, parmi les plus fortes du secteur d'étude (supérieures à 20% au sommet du mont des Cats), sont observées sur ce sous-bassin versant.

Concernant la sensibilité à la battance des sols (paramètre également important dans la genèse du ruissellement), on observe que si elle est forte à l'ouest de la Vleter Becque, elle l'est relativement moins à l'est. Toutefois, dans ces zones où la sensibilité à la battance est plus modérée, les pentes sont très fortes, et le site peut donc potentiellement générer du ruissellement (ce qui fut observé en juillet 2007).

Concernant l'occupation des sols, là encore on peut distinguer l'est et l'ouest de la Vleter Becque : à l'ouest, on rencontre essentiellement des cultures sur des sols à forte battance. A

l'est, l'occupation du sol est plus hétérogène, avec des zones de prairies et de forêt (défavorables à la genèse du ruissellement) ainsi que des zones urbanisées et des cultures (plus favorables au ruissellement).

2.1.3. SOUS BASSIN VERSANT DE L'EY BECQUE EN AMONT DE STEENVOORDE

Concernant le bassin versant en amont de Steenvoorde, on distingue le sous-bassin versant de la Moe Becque et le sous-bassin versant de l'Ey Becque.

Sur le sous-bassin versant de la Moe Becque, les pentes sont plus importantes que sur l'Ey Becque. En revanche, l'occupation du sol y est moins favorable à la genèse du ruissellement, avec davantage de zones de prairies et de surfaces forestières (ce type d'occupation des sols couvre la quasi-totalité des zones où les pentes excèdent les 5%, et les zones à fortes pentes sont couvertes entièrement de forêt au sommet du mont des Récollets). De plus, la sensibilité des sols à la battance est beaucoup plus relative sur le sous-bassin versant de la Moe Becque que sur celui de l'Ey Becque. Par ailleurs, on observe que la battance est faible sur les zones où les pentes sont les plus fortes. Enfin, les désordres recensés lors de la phase 1, reportés sur la carte de pré-localisation des désordres (annexe 12 du rapport de phase 1), sont peu présents sur le sous-bassin versant de la Moe Becque (hormis à l'entrée de Steenvoorde).

A l'inverse, les désordres recensés en phase 1 sont bien présents sur le sous-bassin versant de l'Ey Becque. De plus, des pentes non négligeables, parfois proches de 10%, sont présentes sur le sous-bassin versant de l'Ey Becque. Les sols de l'ensemble de ce sous-bassin versant sont fortement sensibles à la battance. L'occupation des sols est également plus favorable au phénomène de ruissellement. Par ailleurs, la problématique des pentes est déjà prise en compte dans le cadre du sous-bassin versant de la Vleter Becque à Godewaersvelde, puisque celles-ci y semblent prépondérantes.

2.2. METHODOLOGIE RETENUE

L'étude du phénomène de ruissellement sera donc réalisée sur le sous-bassin versant de la Vleter Becque à Godewaersvelde et sur le sous-bassin versant de l'Ey Becque à Steenvoorde. L'objectif est de mieux appréhender ce phénomène, et d'analyser l'impact d'aménagements alternatifs (bandes enherbées, micro-retenues) sur un bassin versant en vue de réduire le ruissellement.

Le modèle PLUTON sera utilisé pour tester l'impact des aménagements alternatifs qui seront proposés.

oOo

3.

MODELISATION HYDRAULIQUE DU BASSIN VERSANT DE L'YSER

3.1. ELABORATION DU MODELE DE SIMULATION DES CRUES

3.1.1. LE LOGICIEL UTILISE

Le logiciel CARIMA, (CAIcul de RIvières MAillées), est un outil de calcul des écoulements à surface libre des régions fluviales (rivières et zones inondables) et des réseaux d'irrigation. Il inclut également des modules spécifiques pour la modélisation d'organes de régulation et de qualité des eaux.

Ce logiciel, développé et enrichi depuis plus de 30 ans, a fait l'objet de plusieurs centaines d'applications pour les besoins des études d'ingénierie

La description des cours d'eau et du terrain est basée sur une large bibliothèque d'objets et d'options qui permettent de représenter finement l'ensemble des situations rencontrées en hydraulique fluviale. En particulier, CARIMA permet de décrire les singularités d'écoulement provoquées par les d'ouvrages (digues, barrages, vannes, orifices, déversoirs, etc.).

CARIMA calcule les écoulements permanents ou non-permanents (par exemple la propagation d'une crue) dans les systèmes modélisés, de manière quasi bidimensionnelle grâce aux maillages réalisés vers les points du lit majeur (casiers).

Le module CASCADE permet de simuler le comportement d'ouvrages mobiles. Le module CONDOR permet le calcul du transport et des réactions chimiques des polluants.

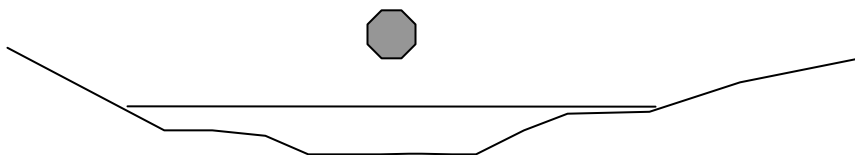
3.1.2. LA TOPOGRAPHIE UTILISEE

La topographie utilisée pour la construction du modèle CARIMA est issue de la campagne de levé topographique réalisée par INGENIO fin 2009 – début 2010.

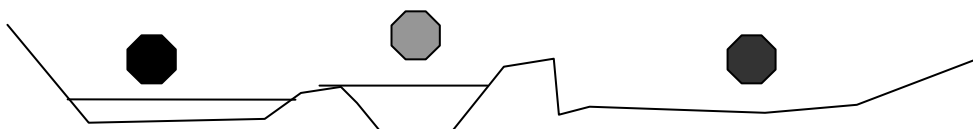
3.1.3. CONSTRUCTION DU MODELE

Le modèle état actuel comprend plus de 571 points de calcul dans le lit mineur et 52 casiers dans le lit majeur.

Il faut préciser que la représentation du lit majeur par des casiers n'est pas systématique et que les points 1D peuvent aussi représenter les lits majeurs associés (chaque fois que le lit global est concave). Les phénomènes d'amortissement et de stockage sont dans tous les cas parfaitement simulés.



Section du lit concave : un seul point de calcul pour représenter la totalité de la section .



Section (ou profil en travers) du lit endigué avec écoulements différenciés.

Dans cette configuration, il est nécessaire, pour représenter les différences de niveaux et d'écoulement entre le lit mineur, le lit majeur rive gauche et le lit majeur rive droite, de mettre un point dans le lit mineur et un point en chaque lit majeur (points de calcul appelés casiers).

Les liaisons entre le lit mineur et le lit majeur ont été toutes modélisées (soit par frottement sur le terrain naturel soit par débordement par-dessus des digues ou bourrelets de digues).

La cartographie du modèle qui présente l'architecture, « le squelette » du modèle état actuel, est jointe en annexe 20.

Il faut noter ici que ce schéma peut être et sera affiné (ajout de points, ajout de liaisons, maillage subdivisé) autant que de besoin pour représenter des aménagements futurs dans le cadre de la phase 3 de l'étude.

Les ouvrages :

Tous les ouvrages de franchissement (lit mineur ou lit majeur) sur le secteur modélisé ont été représentés :

- 26 ouvrages de franchissement sur l'Yser
- 15 ouvrages de franchissement sur la Sale Becque

- 25 ouvrages de franchissement sur la Peene Becque
- 7 ouvrages de franchissement sur la Petite Becque
- 6 ouvrages de franchissement sur le ruisseau d'Houtkerque
- 9 ouvrages de franchissement sur la Moe Becque
- 15 ouvrages de franchissement sur l'Ey Becque
- 4 ouvrages de franchissement sur la Rommel Becque
- 1 ouvrage de franchissement sur la Zwyne Becque
- 3 ouvrages de franchissement sur la Cray Becque
- 18 ouvrages de franchissement sur la Vleter Becque

Chaque ouvrage est modélisé par un point de calcul à l'amont immédiat et un point de calcul à l'aval immédiat de l'ouvrage, lié par des lois hydrauliques spécifiques (seuil, pont).

Ce modèle intègre **également 25 points d'introduction de débits**. Les points d'introduction de débit liés à l'Yser sont :

- Amont du tronçon modélisé
- Confluence avec la Reine Becque
- Aval de Bollezeele
- Confluence avec la Wils Becque
- Aval de la confluence Yser – Peene Becque
- Amont du pont de Bambecque
- Pont d'Houtkerque

Les points d'introduction de débit liés à la Peene Becque sont :

- Amont du tronçon modélisé
- Confluence avec la Lyncke Becque
- Aval d'Ochtezeele
- Confluence avec la Cray Hill Becque
- Confluence avec la Zemerzeele Becque

Le point d'introduction de débit lié à la Cray Becque est l'amont du tronçon modélisé

Les points d'introduction de débit liés à la Sale Becque sont :

- Amont du tronçon modélisé
- Confluence avec la Becque d'Oudezeele

Le point d'introduction de débit lié à la Petite Becque est l'amont du tronçon modélisé

Le point d'introduction de débit lié au ruisseau d'Houtkerque est l'amont du tronçon modélisé

Le point d'introduction de débit lié à la Zwyne Becque est l'amont du tronçon modélisé

Le point d'introduction de débit lié à la Moe Becque est l'amont du tronçon modélisé

Le point d'introduction de débit lié à la Rommel Becque est l'amont du tronçon modélisé

Les points d'introduction de débit liés à l'Ey Becque sont :

- Amont du tronçon modélisé
- Secteur de Warande Houck
- Aval du pont d'Houtkerque

Les points d'introduction de débit liés à la Vleter Becque sont :

- Amont du tronçon modélisé
- Secteur de Oost Houck

3.1.4. CALAGE DU MODELE

Une fois construit, le calage du modèle permet d'ajuster certains paramètres (coefficients de Strickler, coefficients de pertes de charges singulières,...) afin de rendre le modèle reproductif d'un événement connu.

Un événement est hydrauliquement connu lorsque sont connus simultanément pour le même événement :

- Les débits de crue (par des mesures enregistrées aux stations hydrométriques).
- Les laisses de crues (traces, témoignages, marques nivelées par un géomètre).
- La topographie générale de la rivière au moment de la crue.

3.1.4.1. ANALYSE DES CRUES HISTORIQUES

L'analyse générale des crues historiques a été effectuée en phase 1 de l'étude.

3.1.4.1.1. CRUES HIVERNALES

	Débits disponibles	Laisses disponibles	Remarques
Crue de 1991	Stations de Bambecque (manque le pic) et de Roesbrugge	3 sur l'Ey Becque, 1 sur la Cray Becque et données limnimétriques	Recalibrage, curage et changement d'ouvrage depuis la crue
Crue de 1993-94	Stations de Bambecque et Roesbrugge	Uniquement données limnimétriques	Recalibrage, curage et changement d'ouvrage depuis la crue
Crue de	Stations de Bollezeele,	2 sur la Peene Becque, 1 sur la	Crue majeure,

2001	Ochtezeele, Steenvoorde, Bambecque et Roesbrugge	Sale Becque, 1 sur l'Yser, données limnimétriques	photographies aériennes disponibles pour cet événement
Crue de 2002	Stations de Bollezeele, Ochteezele, Steenvoorde, Bambecque et Roesbrugge	1 sur la Peene Becque et données limnimétriques	Crue inférieure à 2002
Crue de 2009	Stations d'Ochtezeele, Steenvoorde, Bambecque et Roesbrugge	1 sur l'Ey Becque, 1 sur la Peene Becque, 1 sur la Cray Becque et données limnimétriques	Crue comparable à 2001

Le choix de l'événement de calage s'est fait sur la base des données disponibles pour les études hydrologique (paragraphe 1.3.3 du présent rapport) et hydraulique. Suite à l'analyse des différents paramètres, il apparaît que l'événement le plus satisfaisant pour réaliser le calage est la crue de 2001 (crue forte, importance des données pluviométriques et hydrométriques disponibles, fond inchangé, nombreuses laisses de crue et photographies aériennes de la crue disponibles).

3.1.4.1.2. CRUES ESTIVALES

	Débits disponibles	Laisses disponibles	Remarques
Crue de 1980	Stations de Bambecque et de Roesbrugge	Uniquement données limnimétriques	Recalibrage, curage et changement d'ouvrage depuis la crue
Crue de 1996	Stations de Bambecque et Roesbrugge	Uniquement données limnimétriques	Recalibrage, curage et changement d'ouvrage depuis la crue
Crue de 2005	Stations de Bollezeele, Ochteezele, Steenvoorde, Bambecque et Roesbrugge	1 sur la Peene Becque, données limnimétriques	Crue importante
Crue de 2007	Stations de Bollezeele, Ochteezele, Steenvoorde, Bambecque et Roesbrugge	1 sur la Peene Becque, 1 sur l'Ey Becque, 1 sur la Moe Becque, 1 sur la Sale Becque, 1 sur le ruisseau d'Houtkerque, 4 sur la Vleter Becque et données limnimétriques	Crue estivale majeure

Le choix de l'événement de calage s'est fait sur la base des données disponibles pour les études hydrologique (paragraphe 1.3.3 du présent rapport) et hydraulique. Suite à l'analyse des différents paramètres, il apparaît que l'événement le plus satisfaisant pour réaliser le calage est la crue de 2007 (crue majeure, importance des données pluviométriques et hydrométriques disponibles, fond inchangé, nombreuses laisses de crue).

3.1.4.2. CONDITIONS INTRODUITES AUX LIMITES DU MODELE

Les hydrogrammes introduits sur l'Yser et ses affluents ont été déterminés à partir du modèle Pluie-Débit (hormis en 2001 pour les bassins versants situés en amont de la station de Bollezeele, où l'hydrogramme mesuré a été reproduit).

La condition aval du modèle du bassin versant de l'Yser est une loi hauteur/débit au niveau de la station hydrométrique de Roesbrugge.

Pour le modèle de la Vleter Becque, une loi hauteur/débit a été établie au niveau de la confluence entre la Vleterbeek et la Winterbeek à l'aide des données fournies par le modèle hydraulique réalisé par les partenaires belges de l'étude, et sert de condition aval.

3.1.5. ANALYSE DES SIMULATIONS DE CALAGE

3.1.5.1. CRUE DE 2001

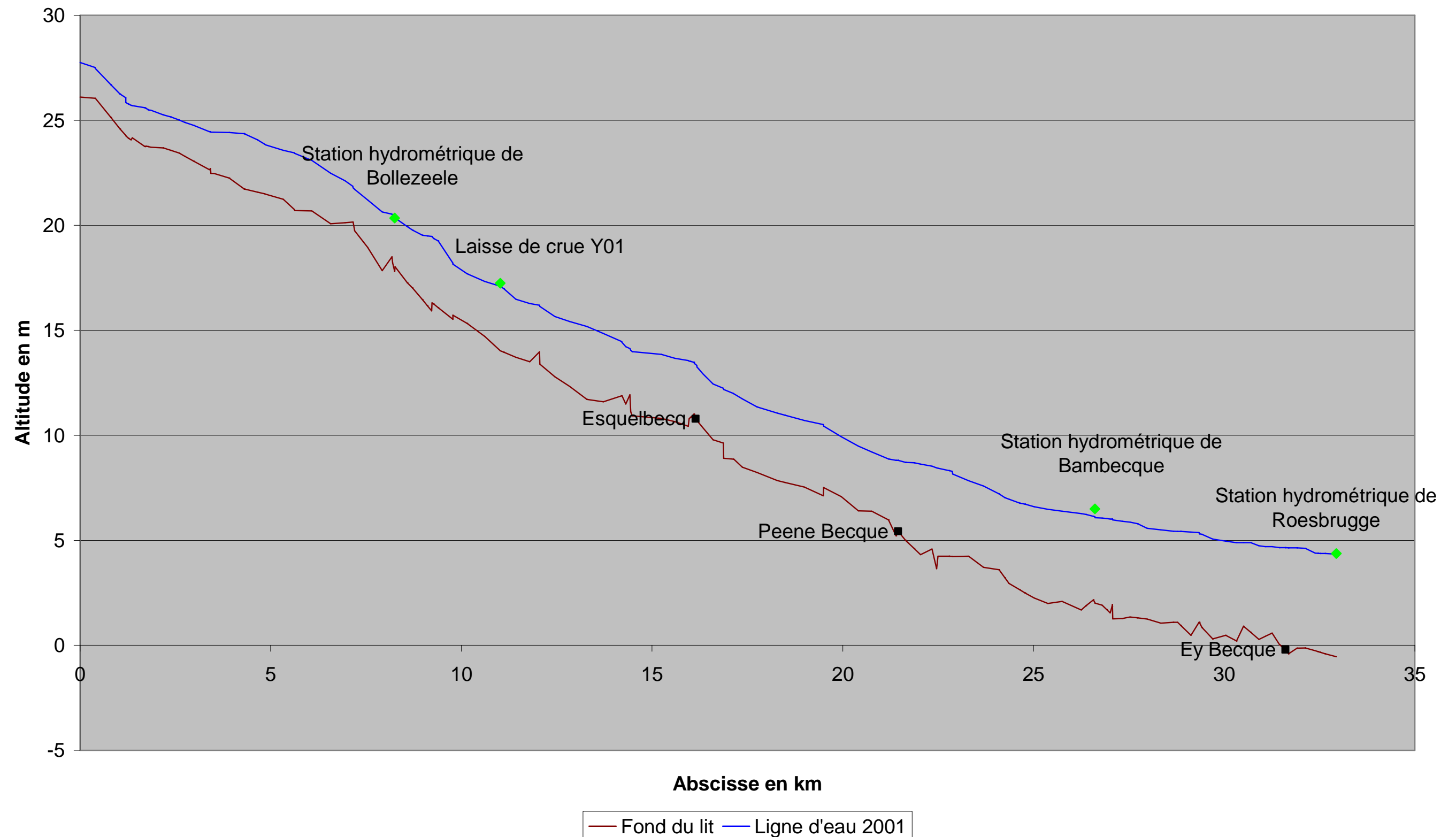
Suite aux constats faits au paragraphe 1.4.2.2.3, ainsi qu'à l'absence de laisses de crues fournies lors d'événements hivernaux (y compris en 2001), il n'a pas été possible de réaliser un véritable calage du modèle de la Vleter Becque pour la crue hivernale.

3.1.5.1.1. ANALYSE DES NIVEAUX OBTENUS

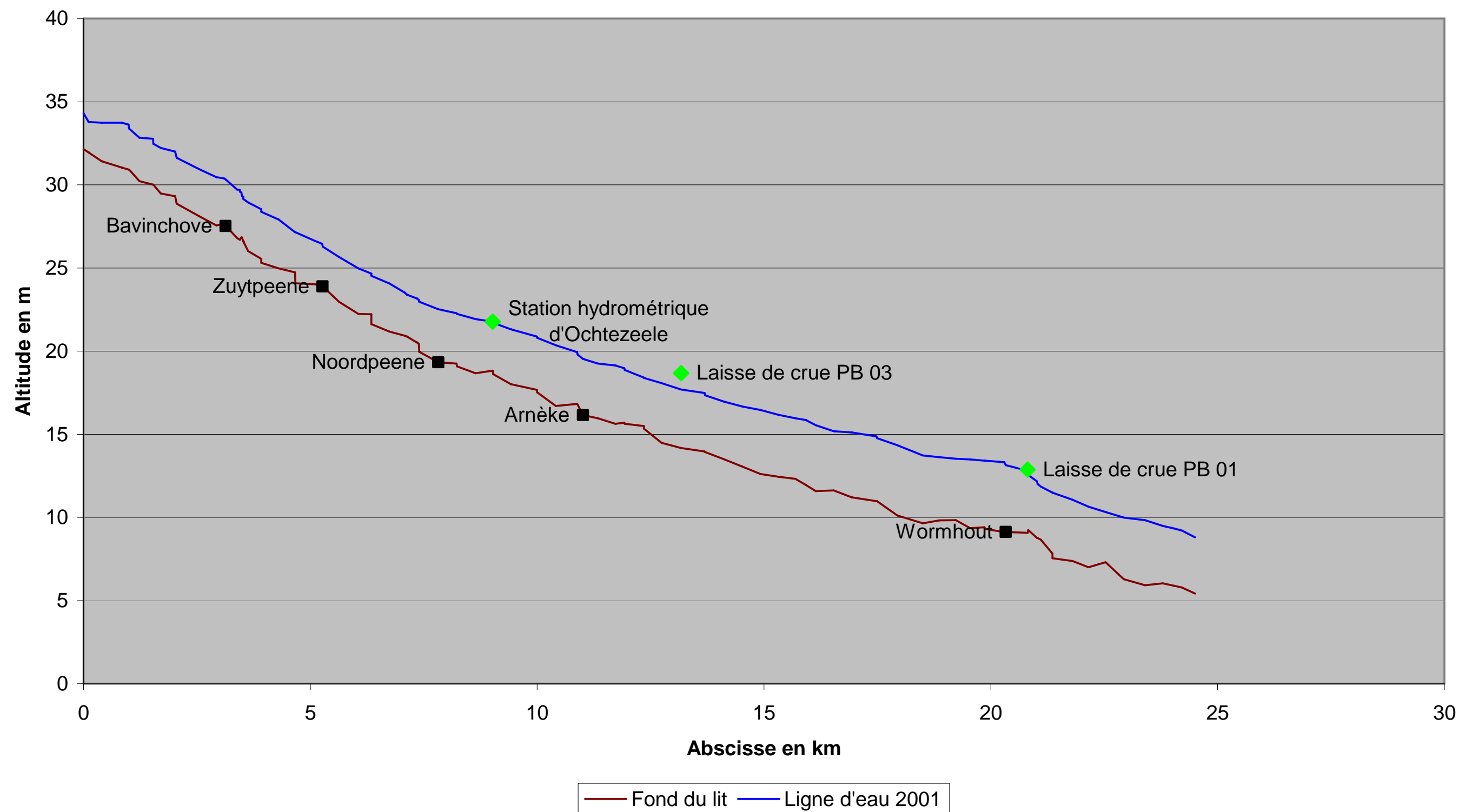
A. Bassin versant de l'Yser

Les profils en long ci-après présentent d'une part les laisses reconstituées de la crue de 2001, d'autre part la ligne d'eau calculée par le modèle hydraulique dans le cadre du calage.

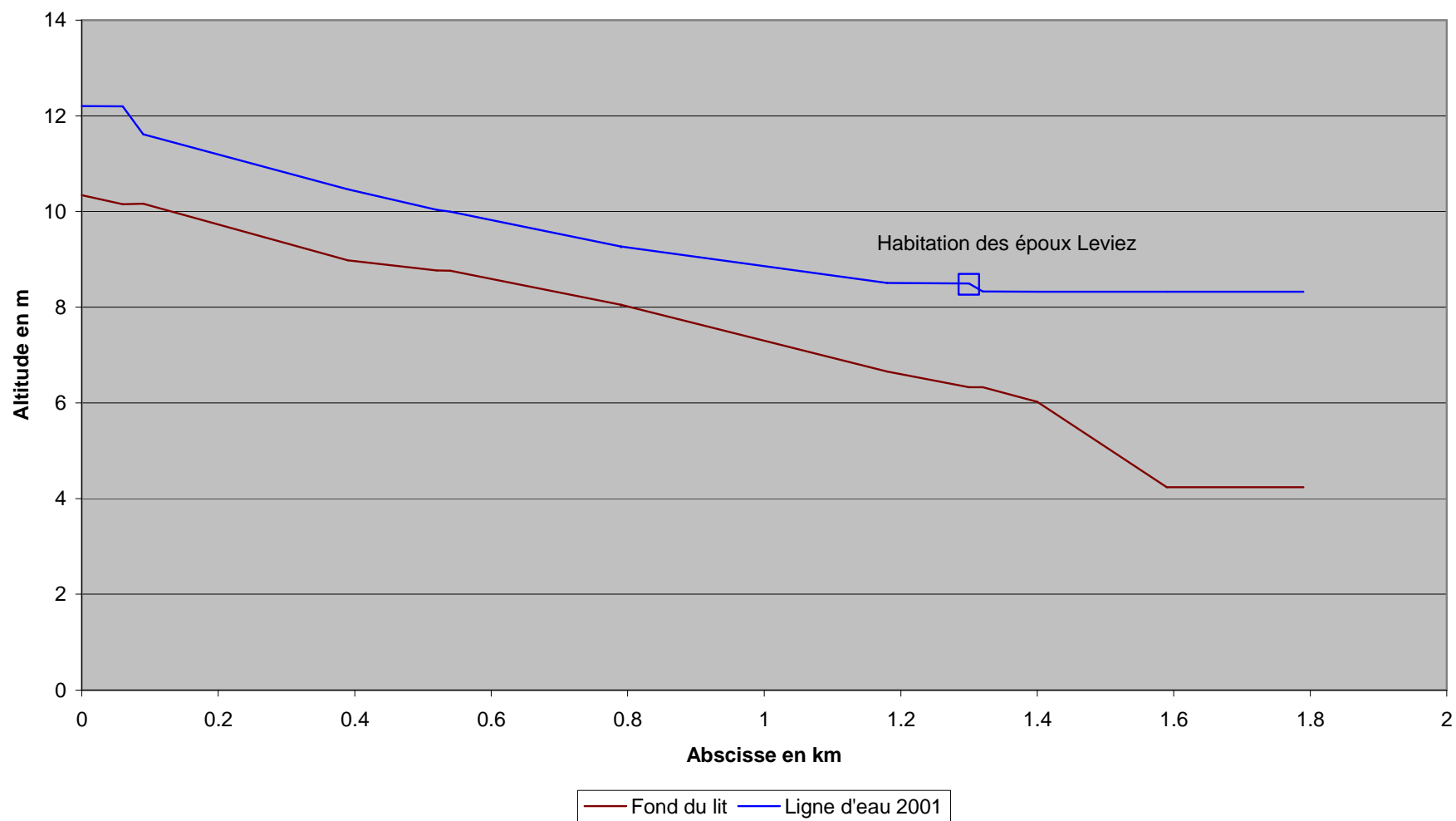
Profil en long de l'Yser



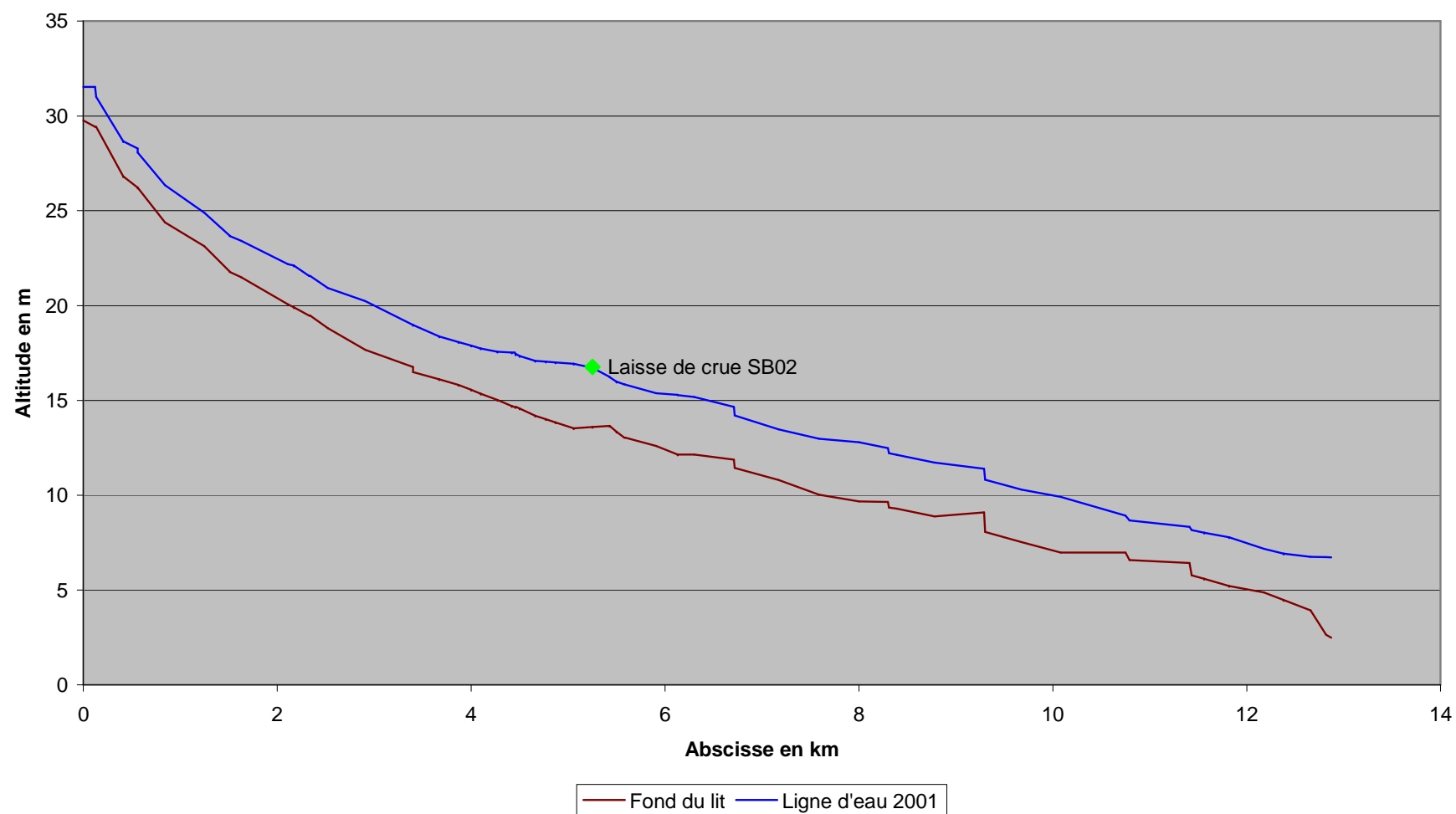
Profil en long de la Peene Becque



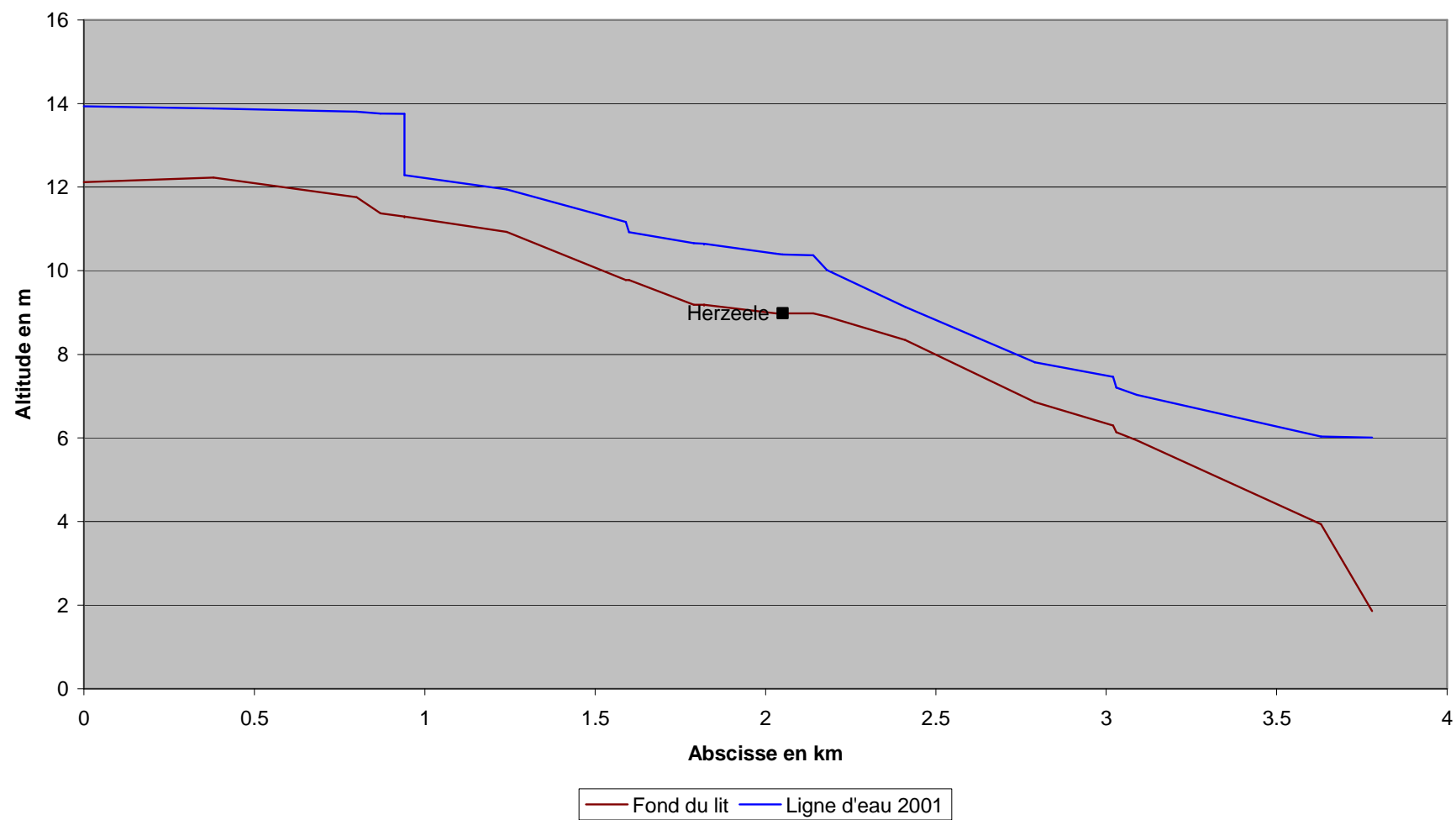
Profil en long de la Cray Becque



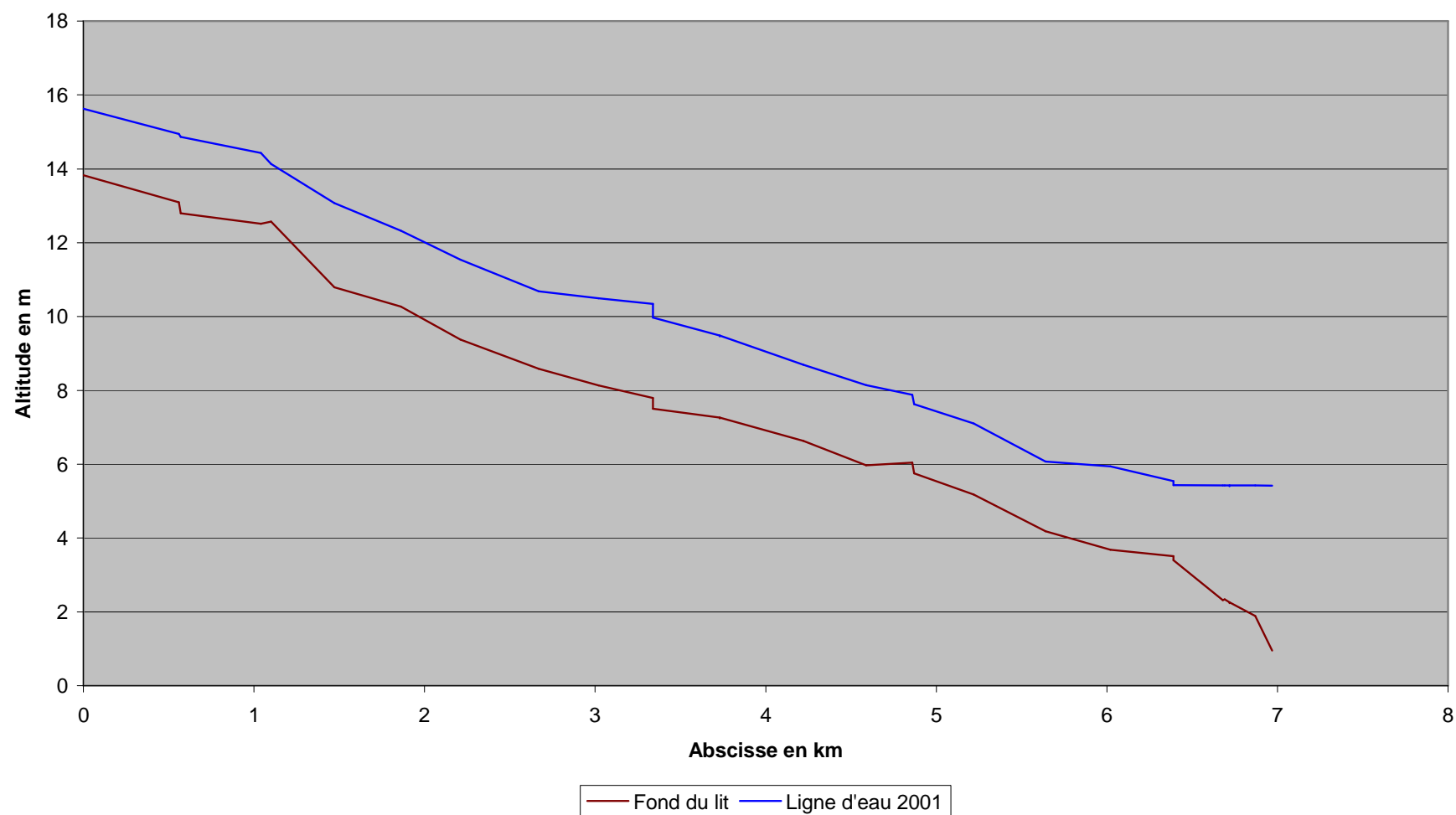
Profil en long de la Sale Becque



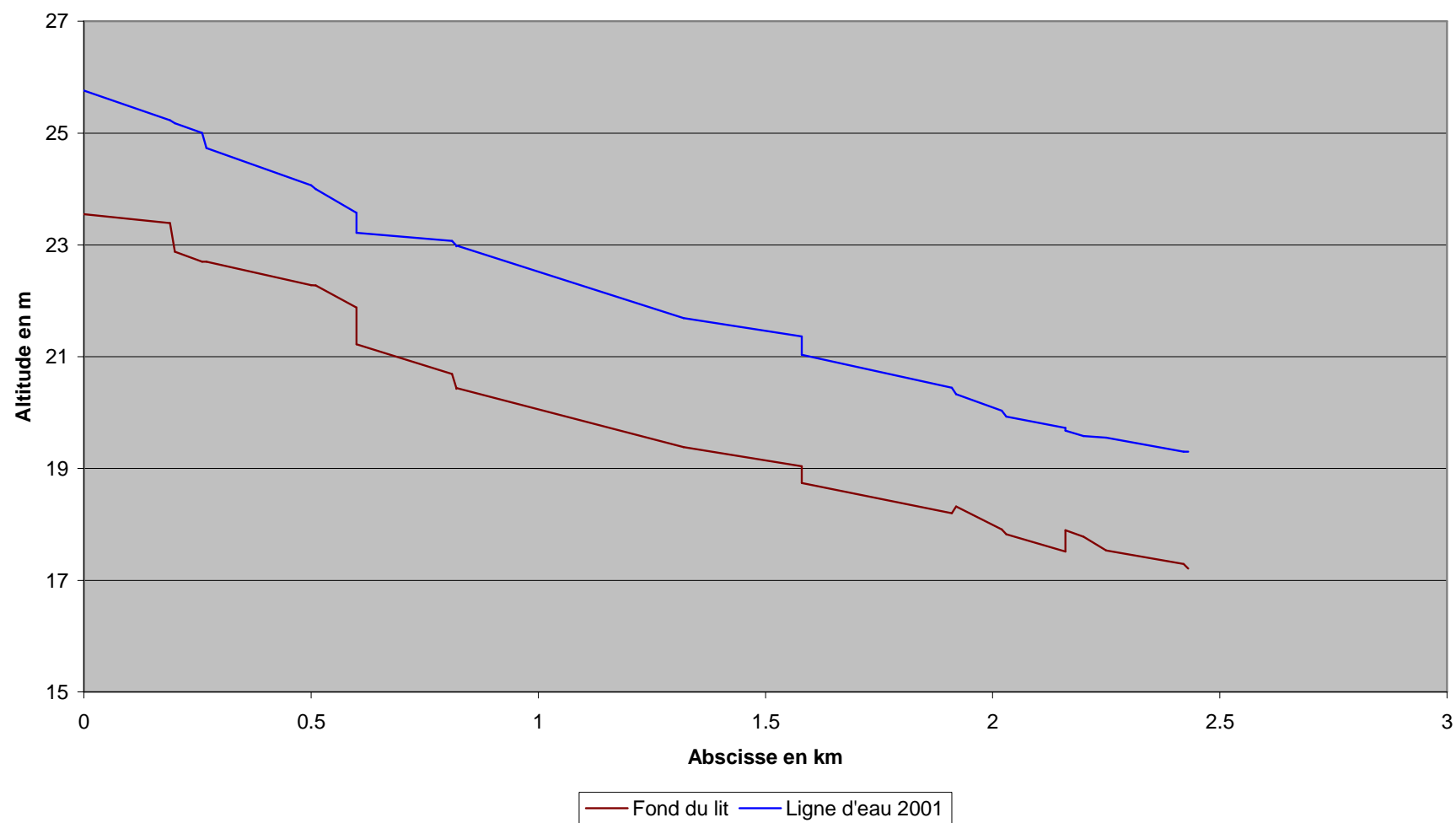
Profil en long de la Petite Becque



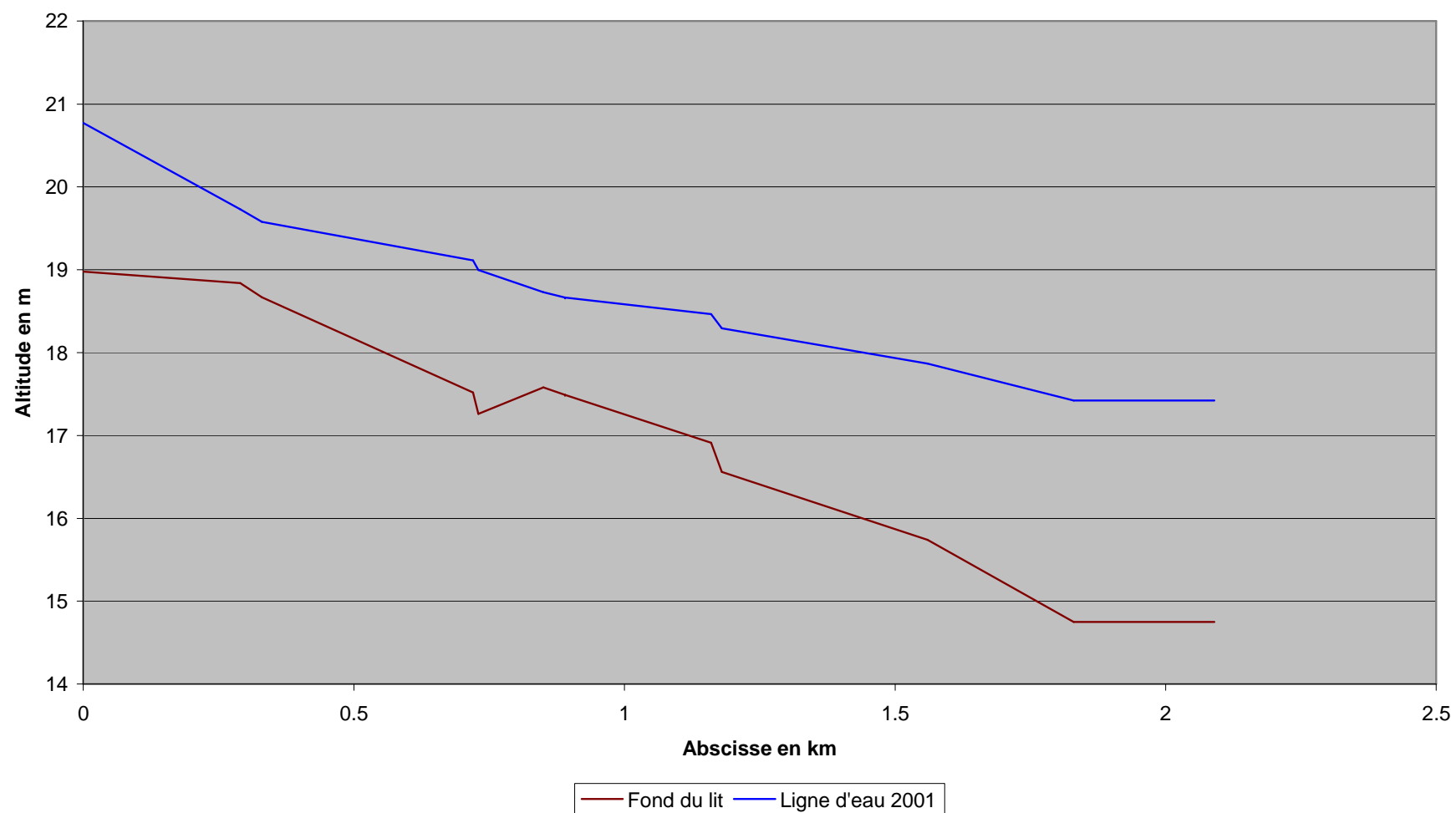
Profil en long du ruisseau d'Houtkerque



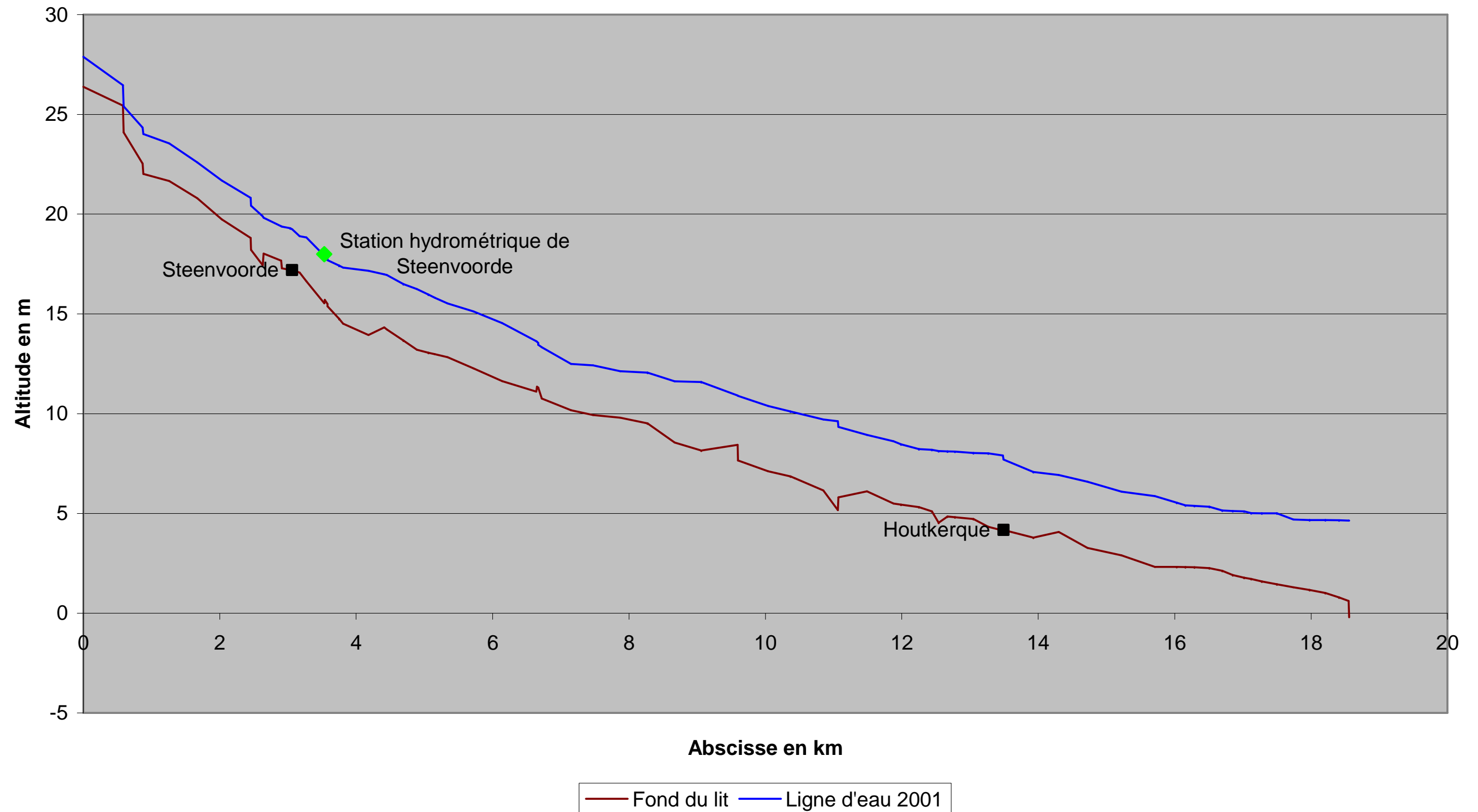
Profil en long de la Moe Becque



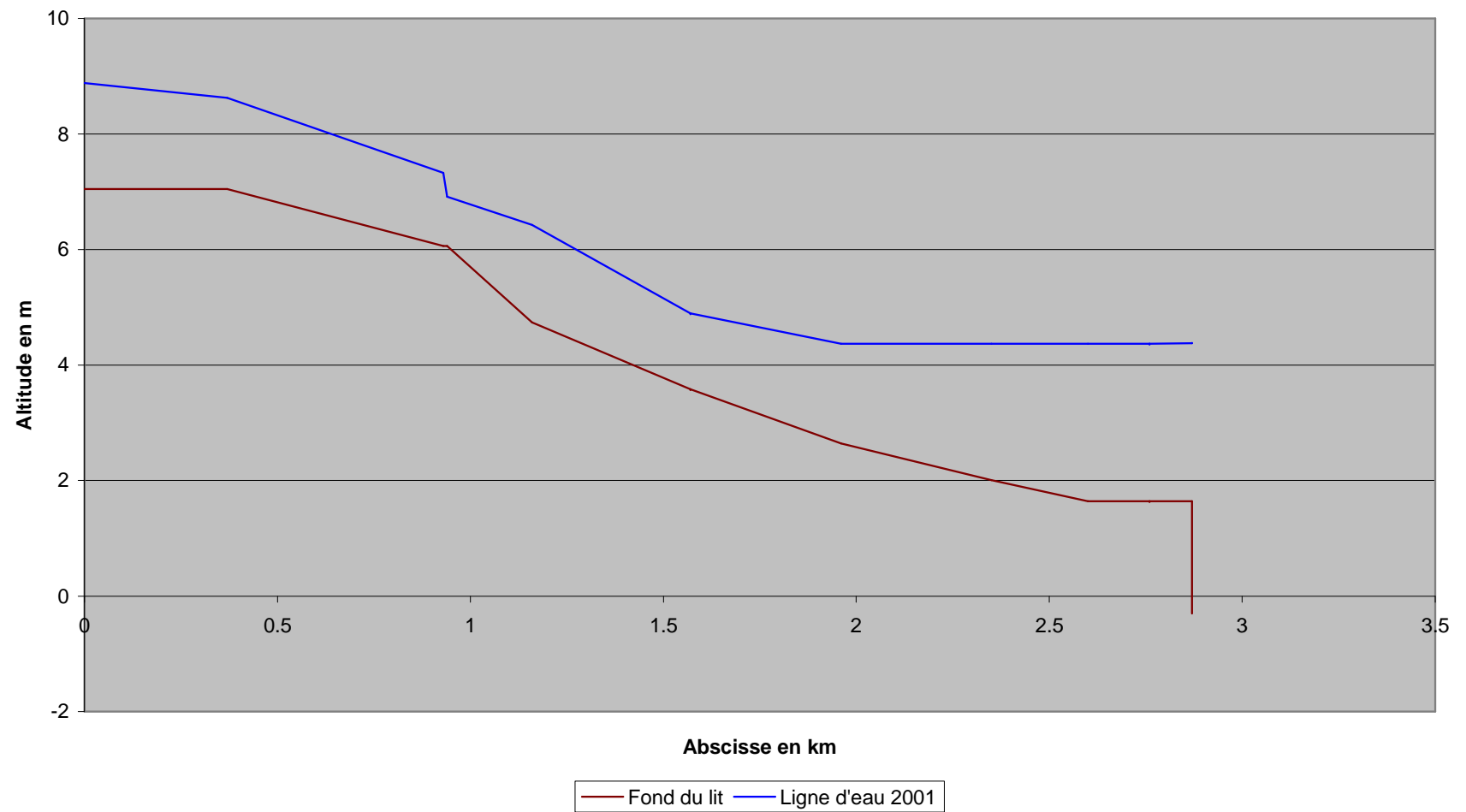
Profil en long de la Rommel Becque



Profil en long de l'Ey Becque



Profil en long de la Zwyne Becque



Ces différents profils en long mettent en évidence une bonne cohérence entre les niveaux calculés et les laisses de crue obtenues pour la crue de septembre 2001.

On remarque toutefois un écart entre la laisse de crue PB03 et la ligne d'eau calculée. Toutefois, cette laisse de crue est issue d'un témoignage incertain, et une erreur lors des levés topographiques ne peut être exclue car il n'y avait pas vraiment de repère sur le terrain permettant de lever exactement le point indiqué sur la fiche de laisses de crue.

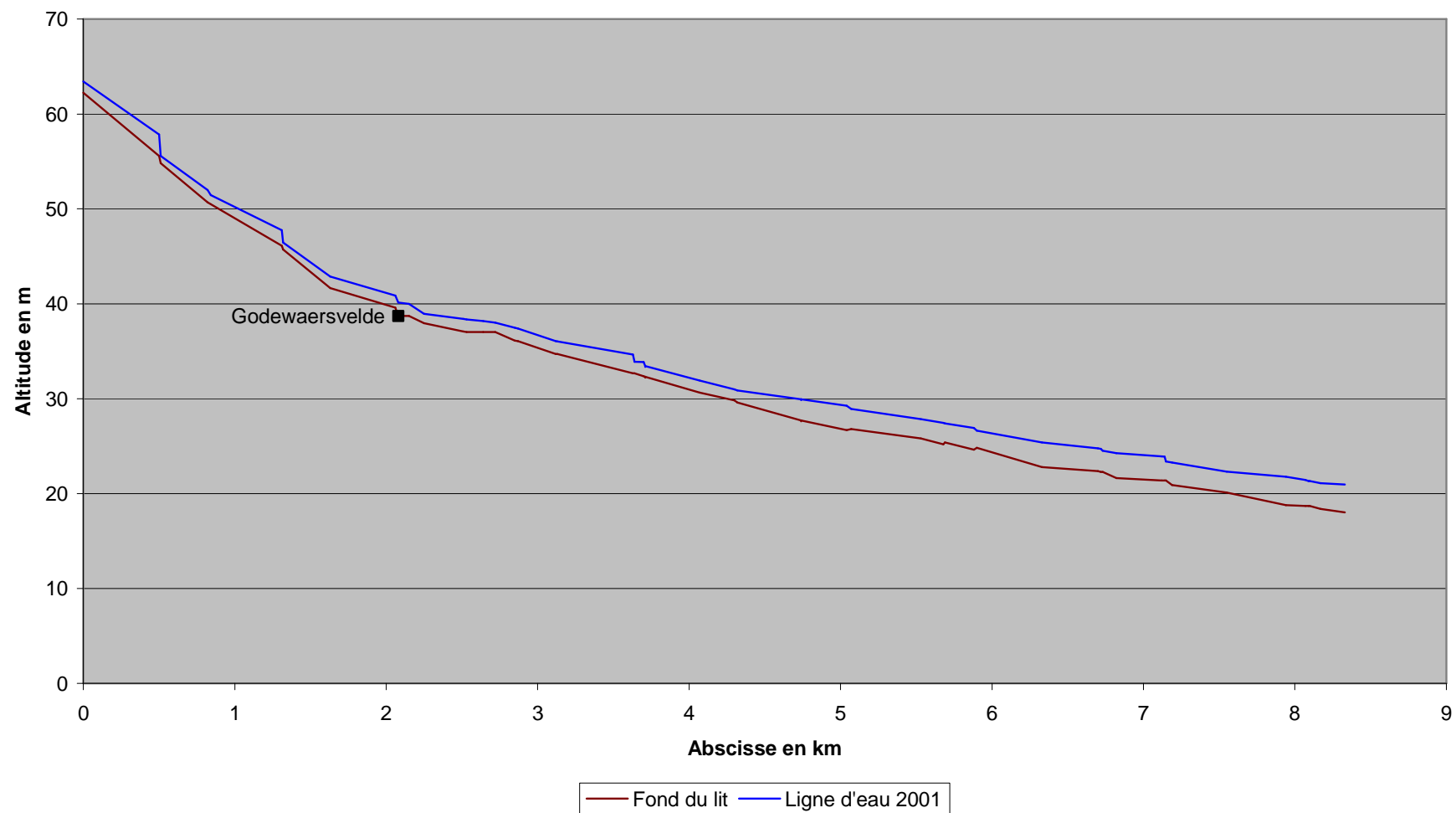
La zone inondable calculée a également été superposée à la limite observée de la crue de 2001 par photographies aériennes (voir [annexe 21](#))

Les deux limites sont globalement très cohérentes à l'exception de certains secteurs où une analyse spécifique a été mise en œuvre.

B. Bassin versant de la Vleter Becque

A titre indicatif, le profil en long de la ligne d'eau modélisé en 2001 est présenté ci-après. Il n'y a pas de laisse de crue disponible pour cet événement, ni pour aucun autre en période hivernale.

Profil en long de la Vleter Becque

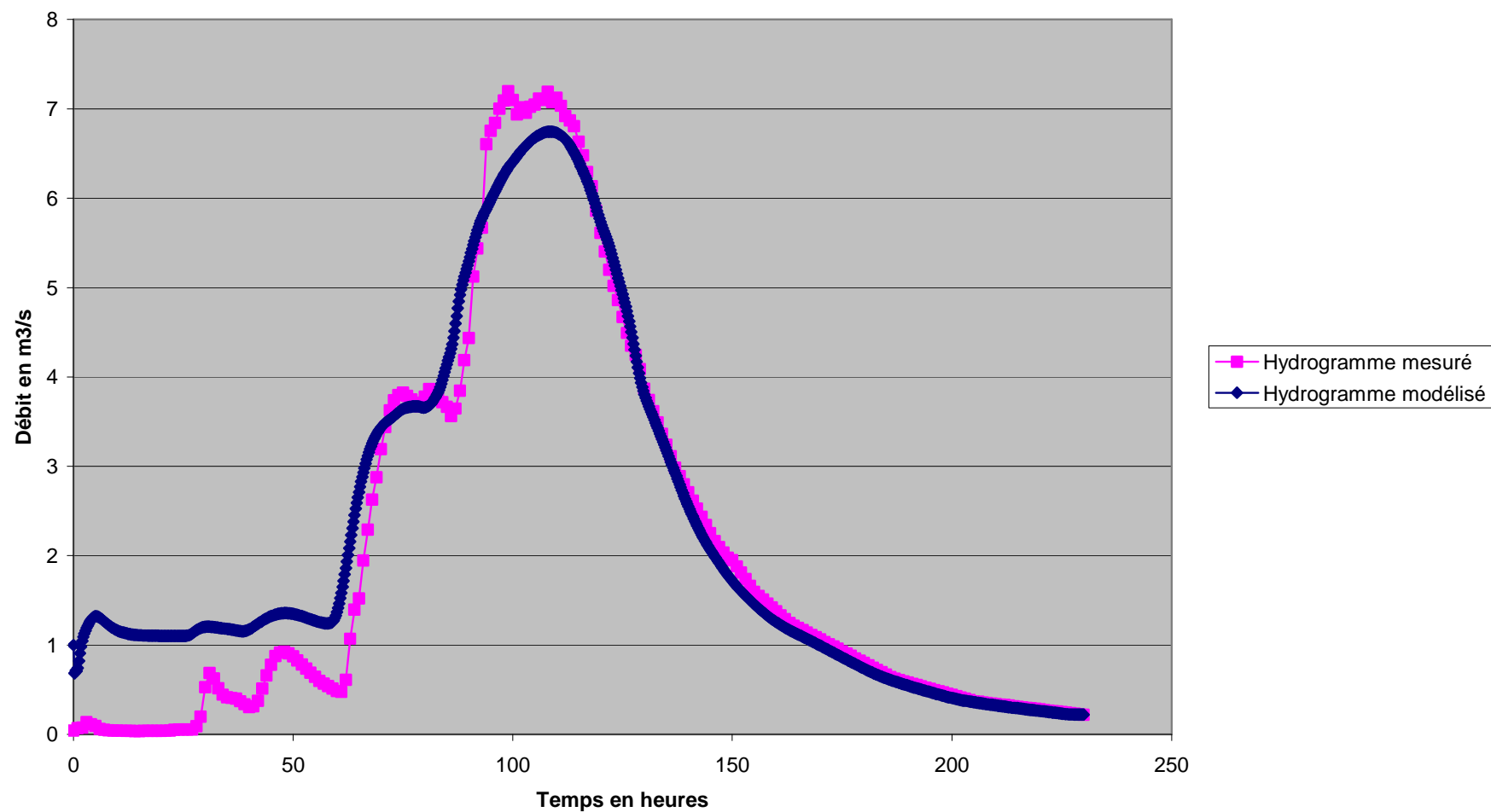


3.1.5.1.2. ANALYSE DES DÉBITS OBTENUS

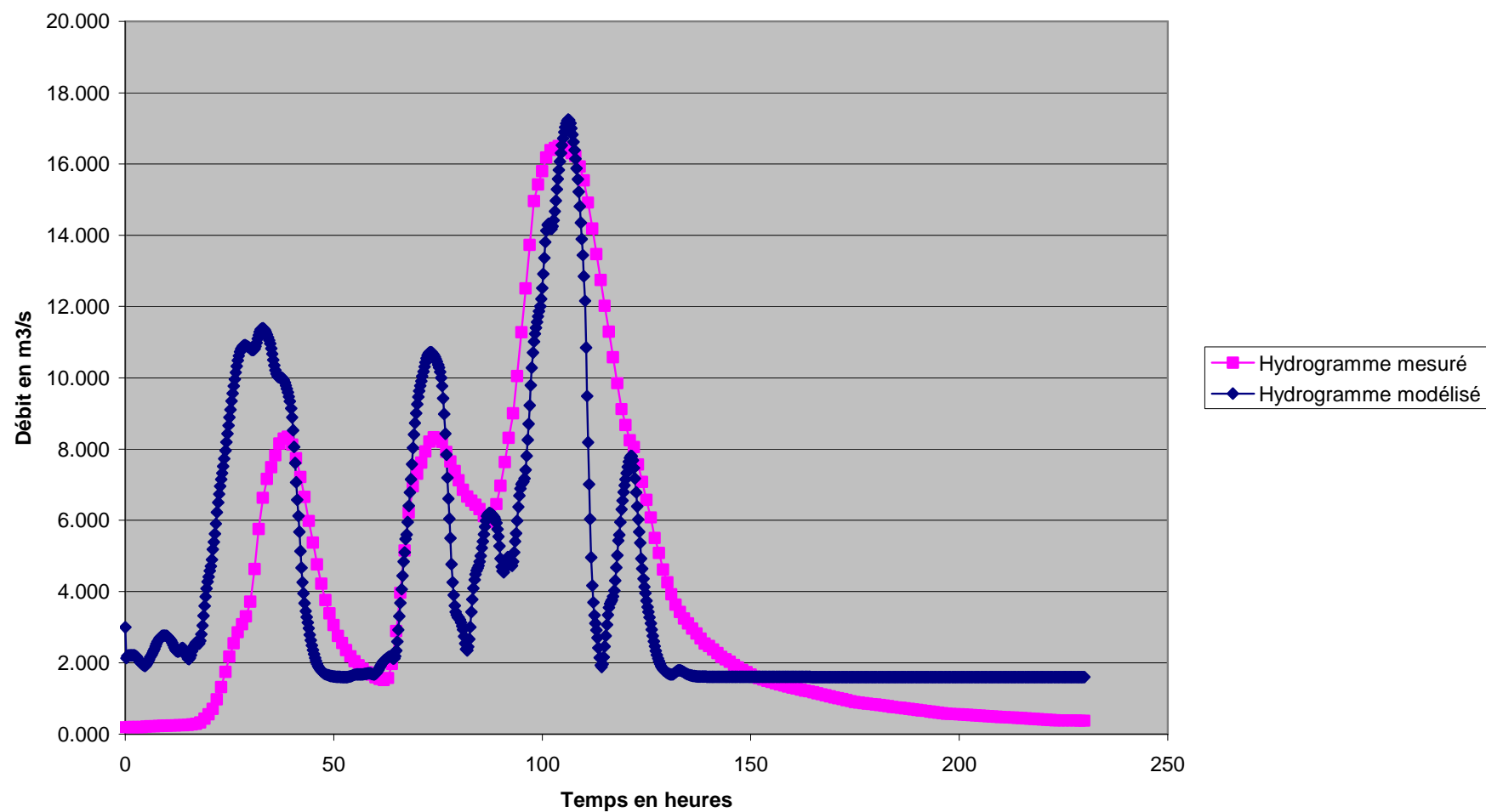
A. Bassin versant de l'Yser

Les hydrogrammes obtenus aux différentes stations hydrométriques sont présentés dans les pages qui suivent.

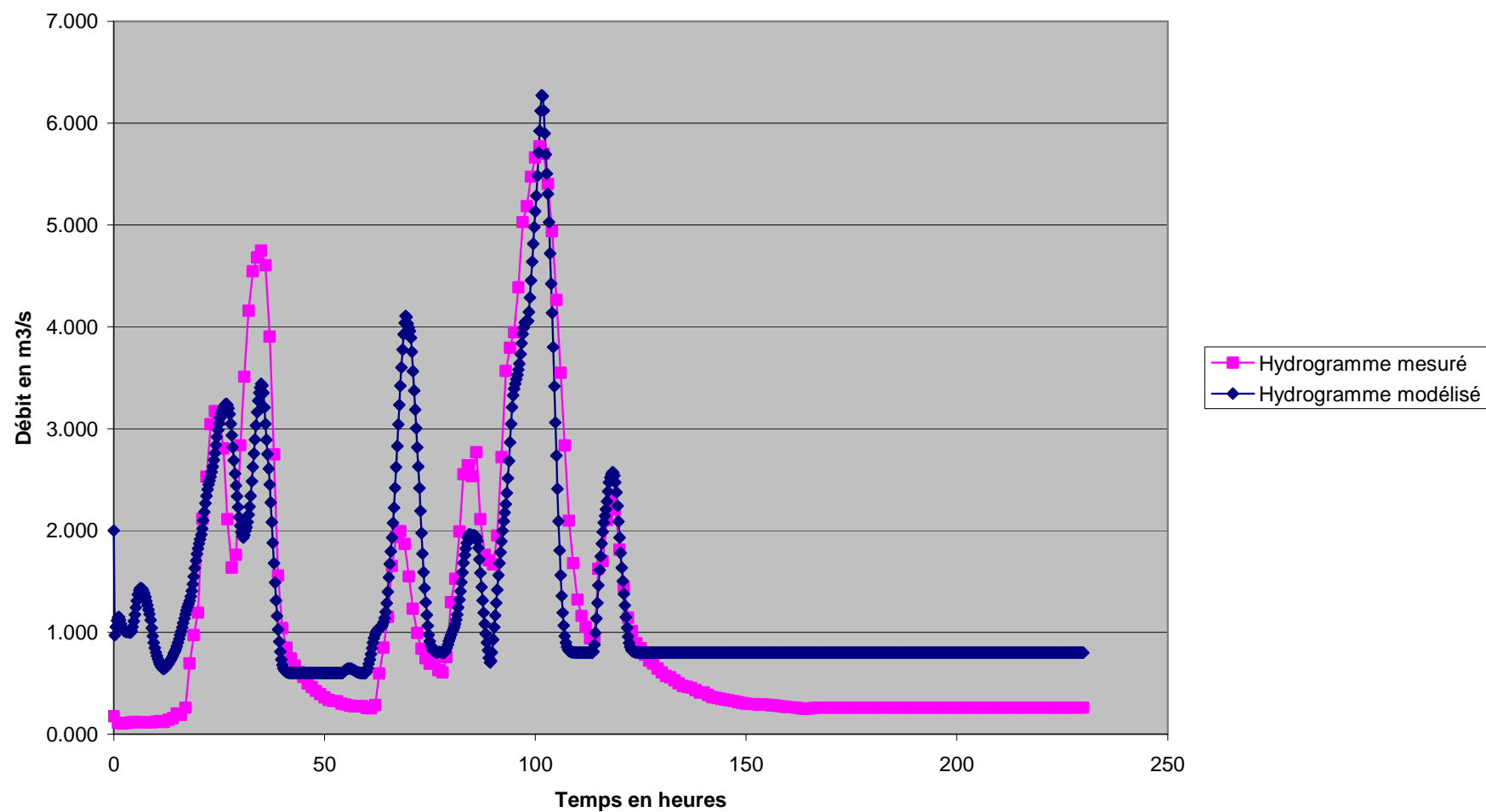
Station hydrométrique de Bollezeele - septembre 2001



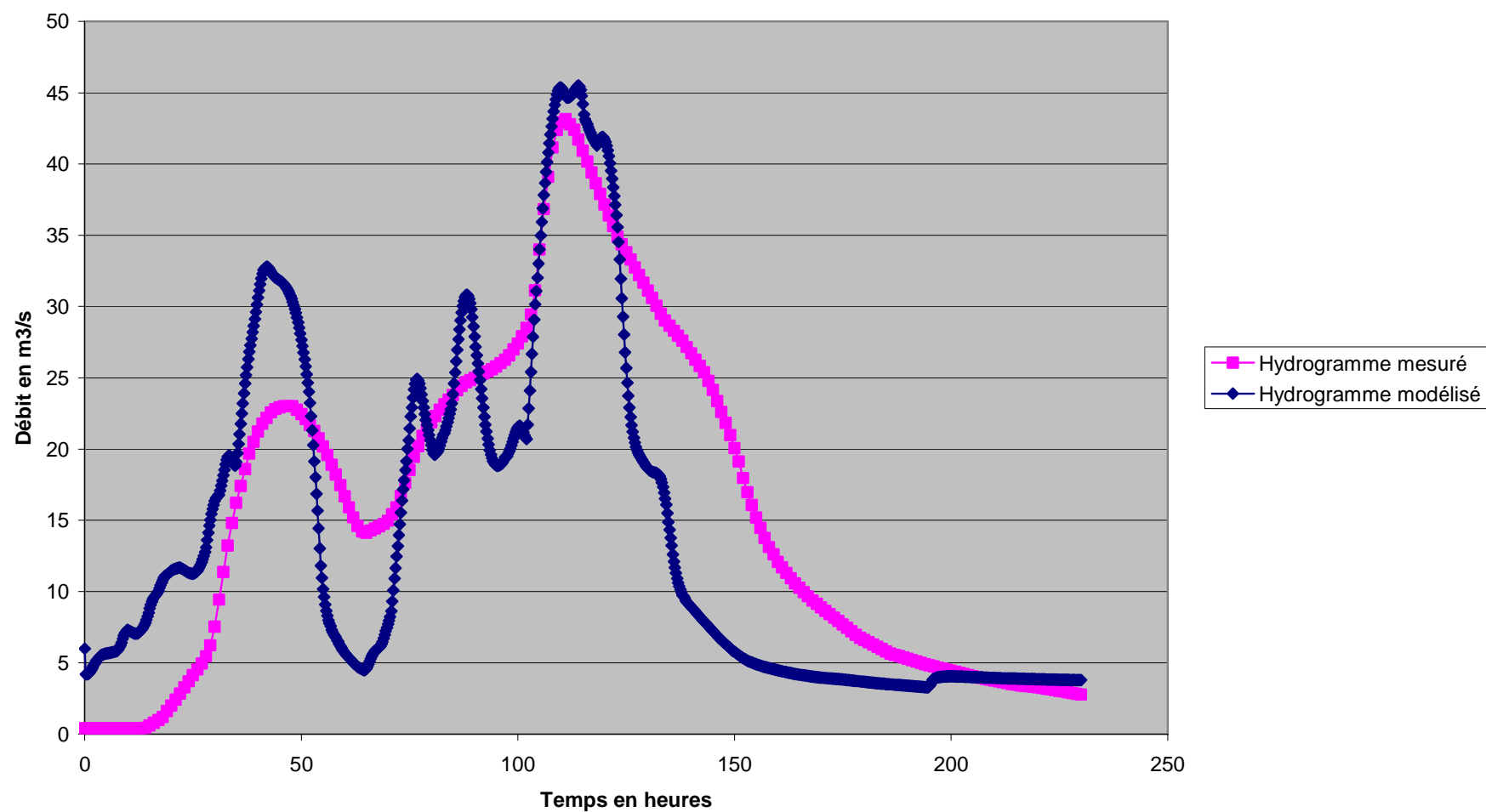
Station hydrométrique d'Ochtezeele - septembre 2001



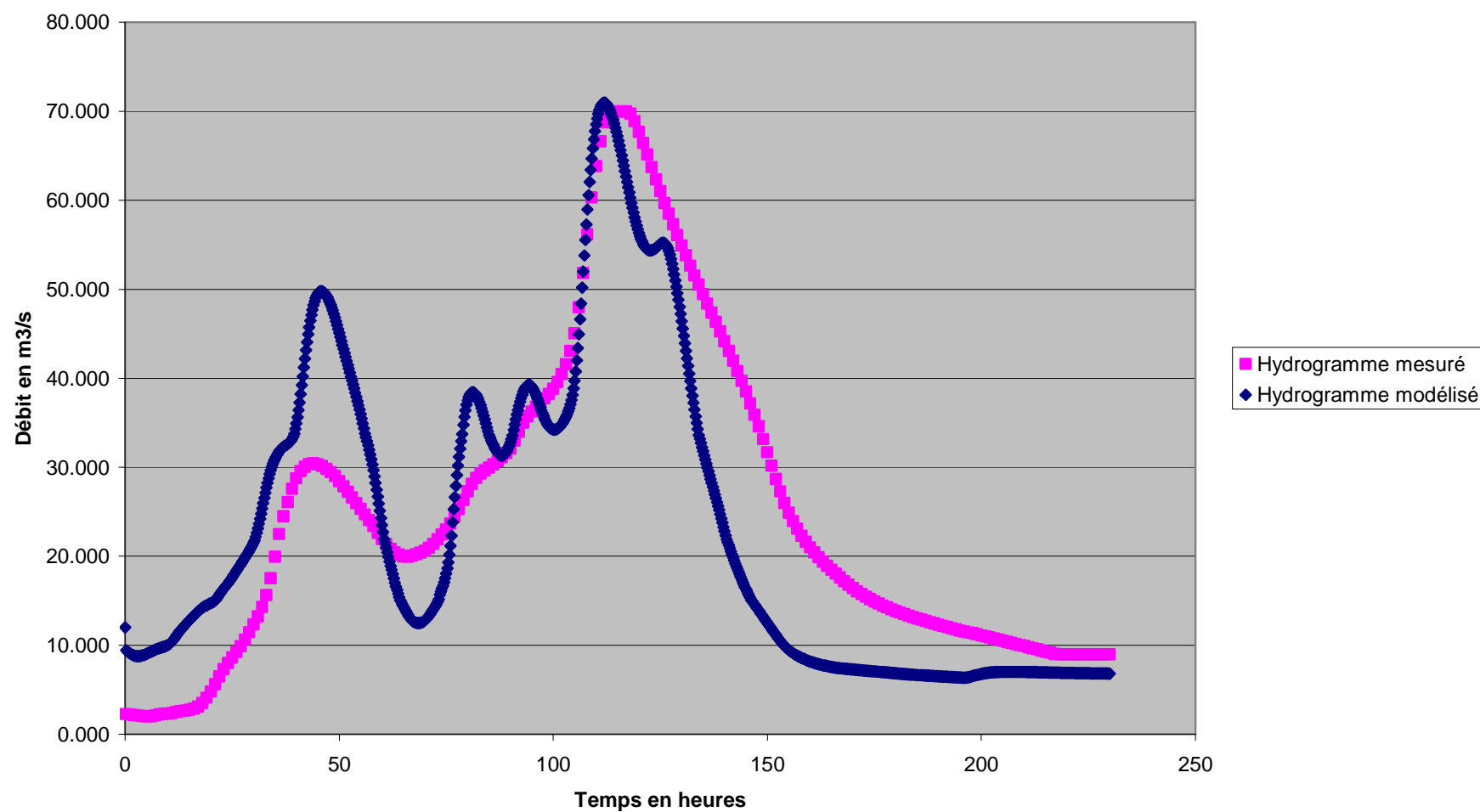
Station hydrométrique de Steenvoorde - septembre 2001



Station hydrométrique de Bambecque - septembre 2001



Station hydrométrique de Roesbrugge - septembre 2001



On constate que les temps de montée en crue sont relativement similaires entre les hydrogrammes mesurés et modélisés. Ils ne sont cependant pas vraiment comparables sur leurs temps de base du fait du défaut d'évacuation de l'Yser à la mer. Pour la même raison, les volumes de crue modélisés et mesurés ne peuvent être comparés.

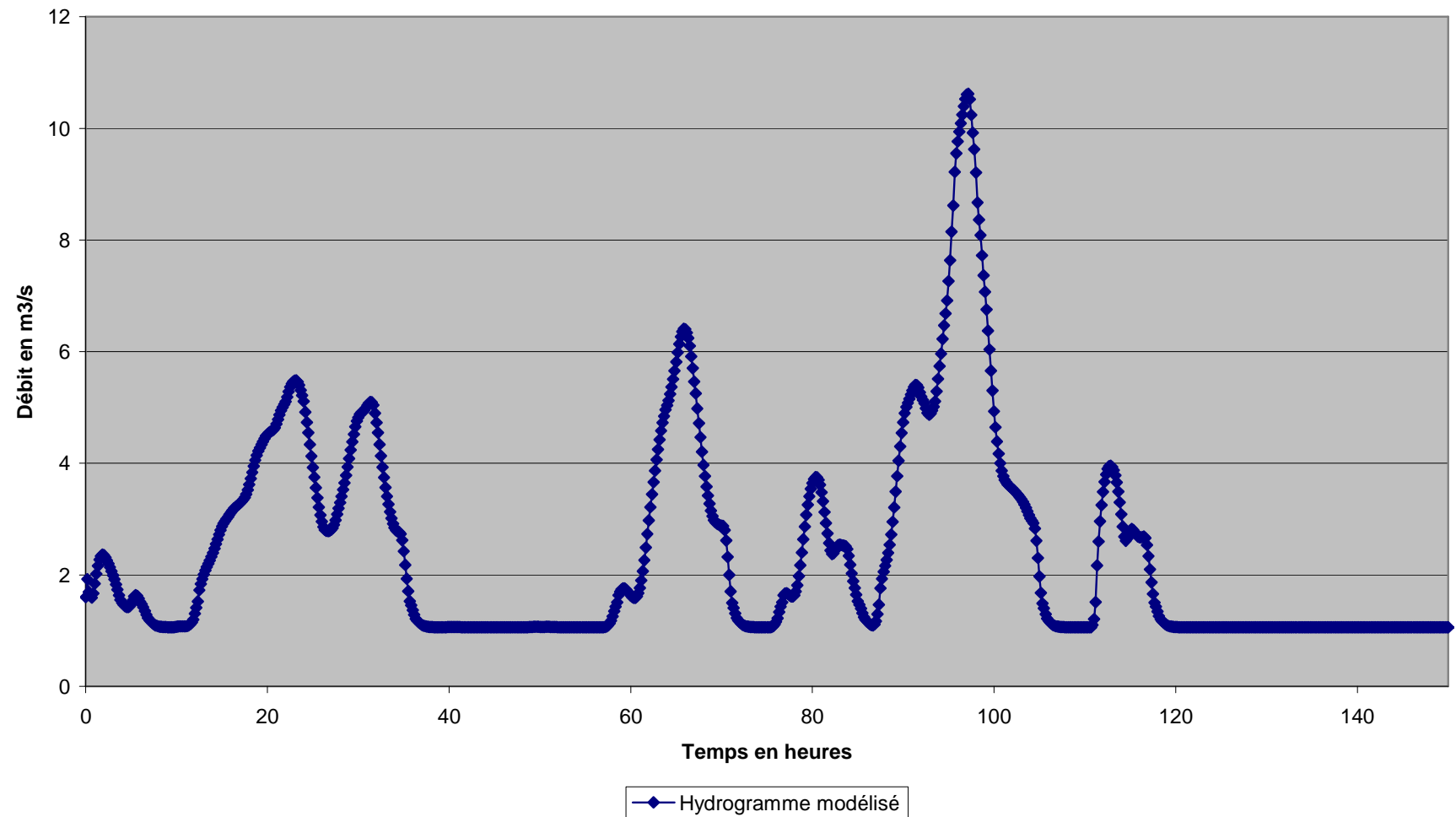
Stations hydrométriques	Débit de pointe mesuré en m ³ /s	Débit de pointe modélisé en m ³ /s	Ecart
Bollezeele	7,20	6,75	-6%
Ochtezeele	16,52	17,25	+4%
Steenvoorde	5,78	6,27	+8%
Bambecque	43,14	45,51	+5%
Roesbrugge	70	70,97	+1%

On constate par ailleurs que les débits de pointe obtenus pour l'événement de calage sont cohérents avec les débits de pointe mesurés aux différentes stations hydrométriques en septembre 2001.

B. Bassin versant de la Vleter Becque

A titre indicatif, l'hydrogramme modélisé sur la Vleter Becque en 2001 est présenté ci-après.

Hydrgramme modélisé à la confluence entre la Vleterbeek et la Wintebeek - crue de septembre 2001



3.1.5.1.3. *SYNTHESE SUR LE CALAGE*

A. Bassin versant de l'Yser

- La crue de 2001 a été utilisée pour réaliser le calage hydraulique en situation hivernale.
- Le calage du modèle est très satisfaisant en terme de niveau et en terme de débit de pointe.
- Le calage sur les volumes de crue et sur la durée de crue est moins satisfaisant (notamment à partir de la décrue) du fait du défaut d'évacuation de l'Yser à la mer.

B. Bassin versant de la Vleter Becque

Faute de données (laisses de crue,...) il n'a pas été possible d'effectuer le calage hydraulique du modèle de la Vleter Becque en situation hivernale. Une comparaison a tout de même été effectuée par rapport aux éléments connus sur la crue de 2001 (terres agricoles en partie inondées, pas d'inondation d'habitations ou de routes), celle-ci s'est révélée satisfaisante.

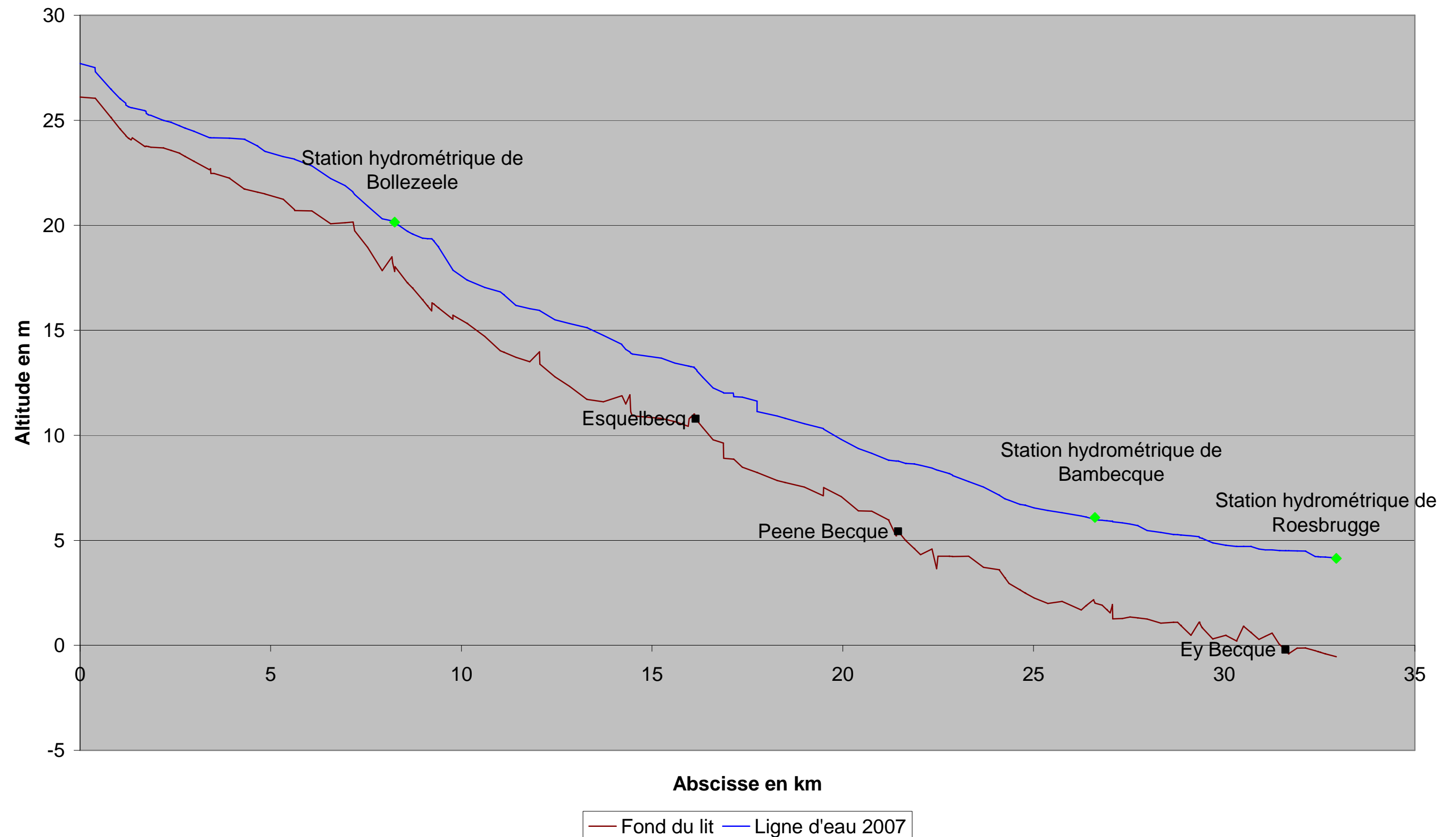
3.1.5.2. CRUE DE 2007

3.1.5.2.1. *ANALYSE DES NIVEAUX OBTENUS*

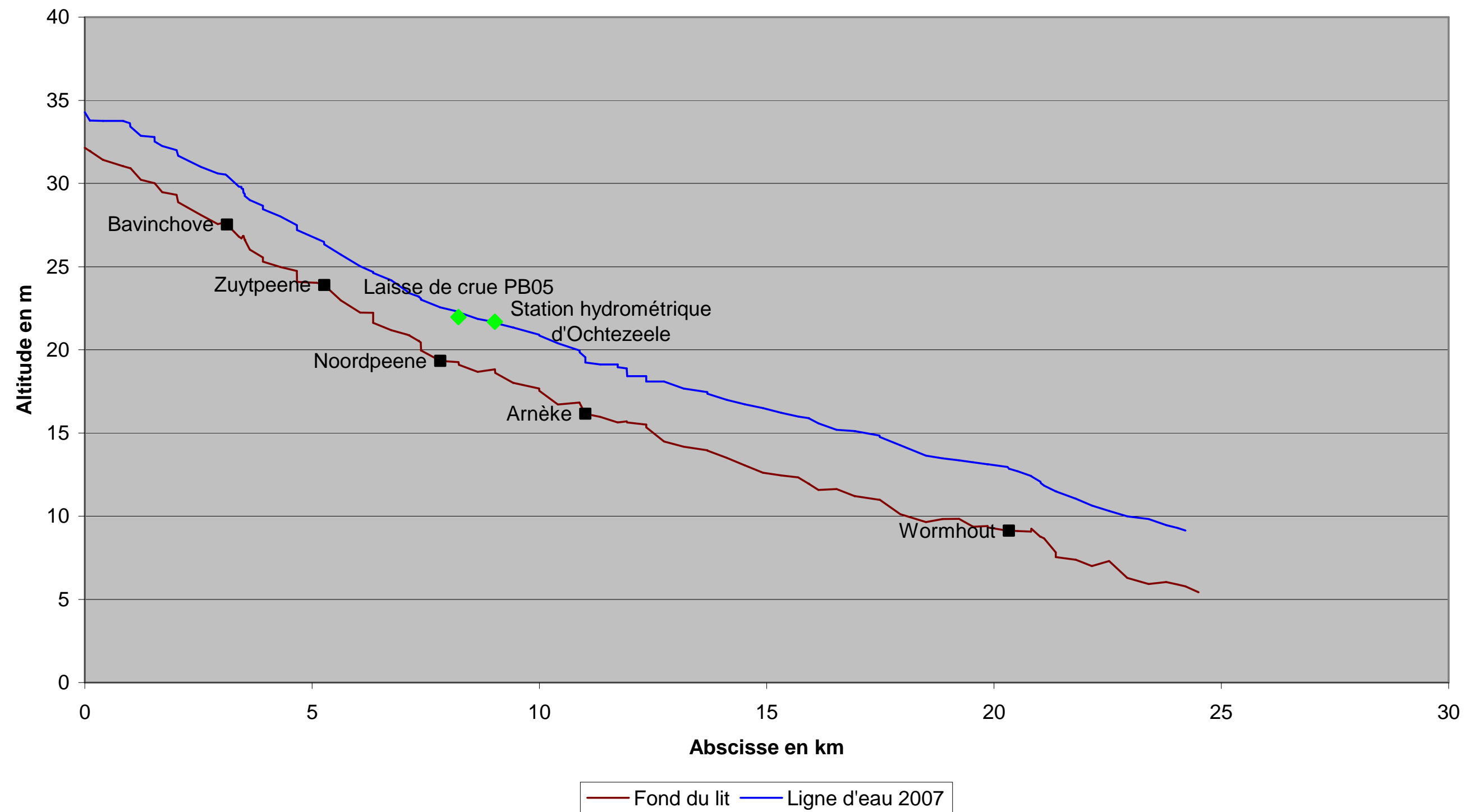
A. Bassin versant de l'Yser

Les profils en long ci-après présentent d'une part les laisses reconstituées de la crue de 2007, d'autre part la ligne d'eau calculée par le modèle hydraulique dans le cadre du calage.

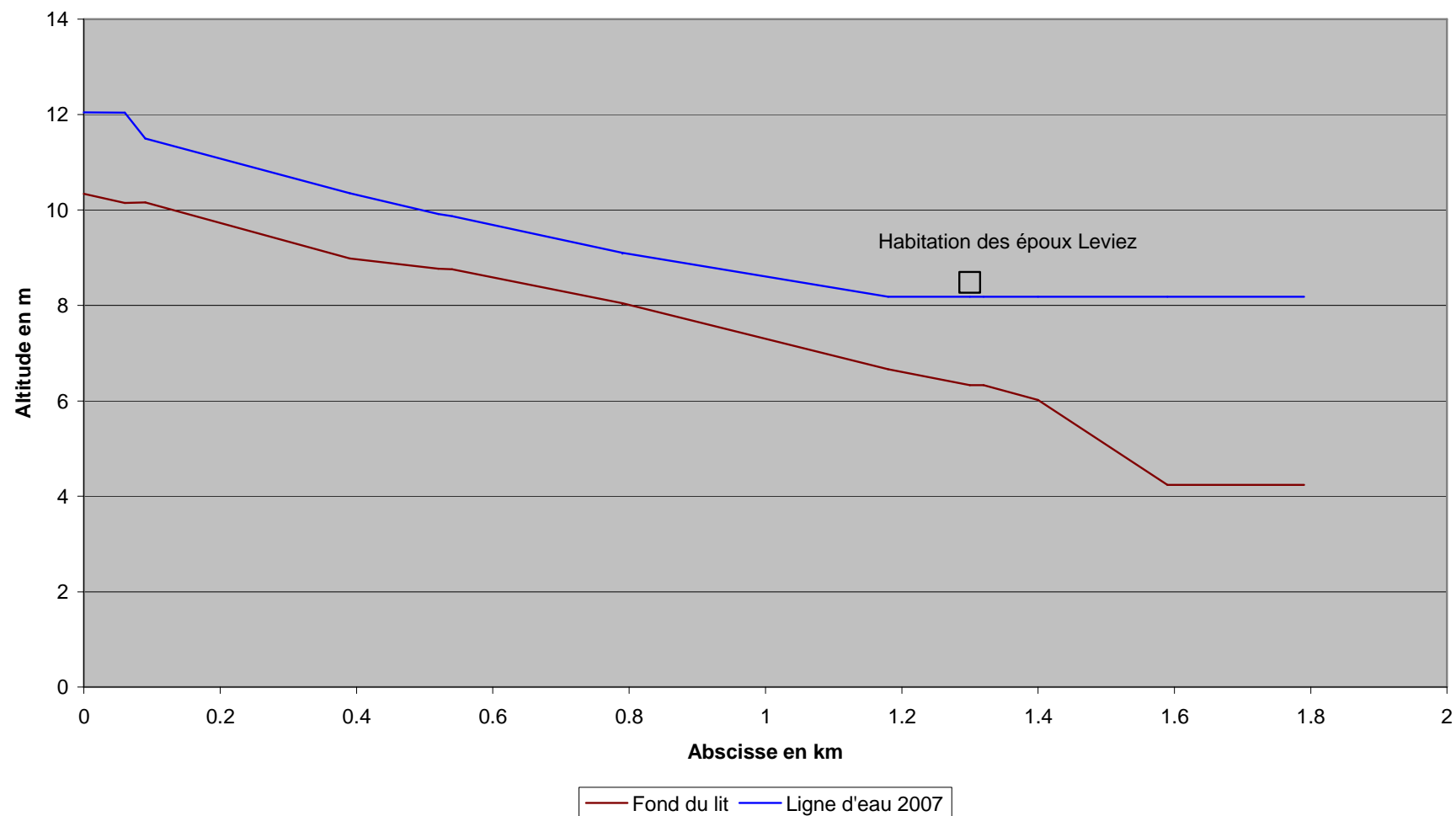
Profil en long de l'Yser



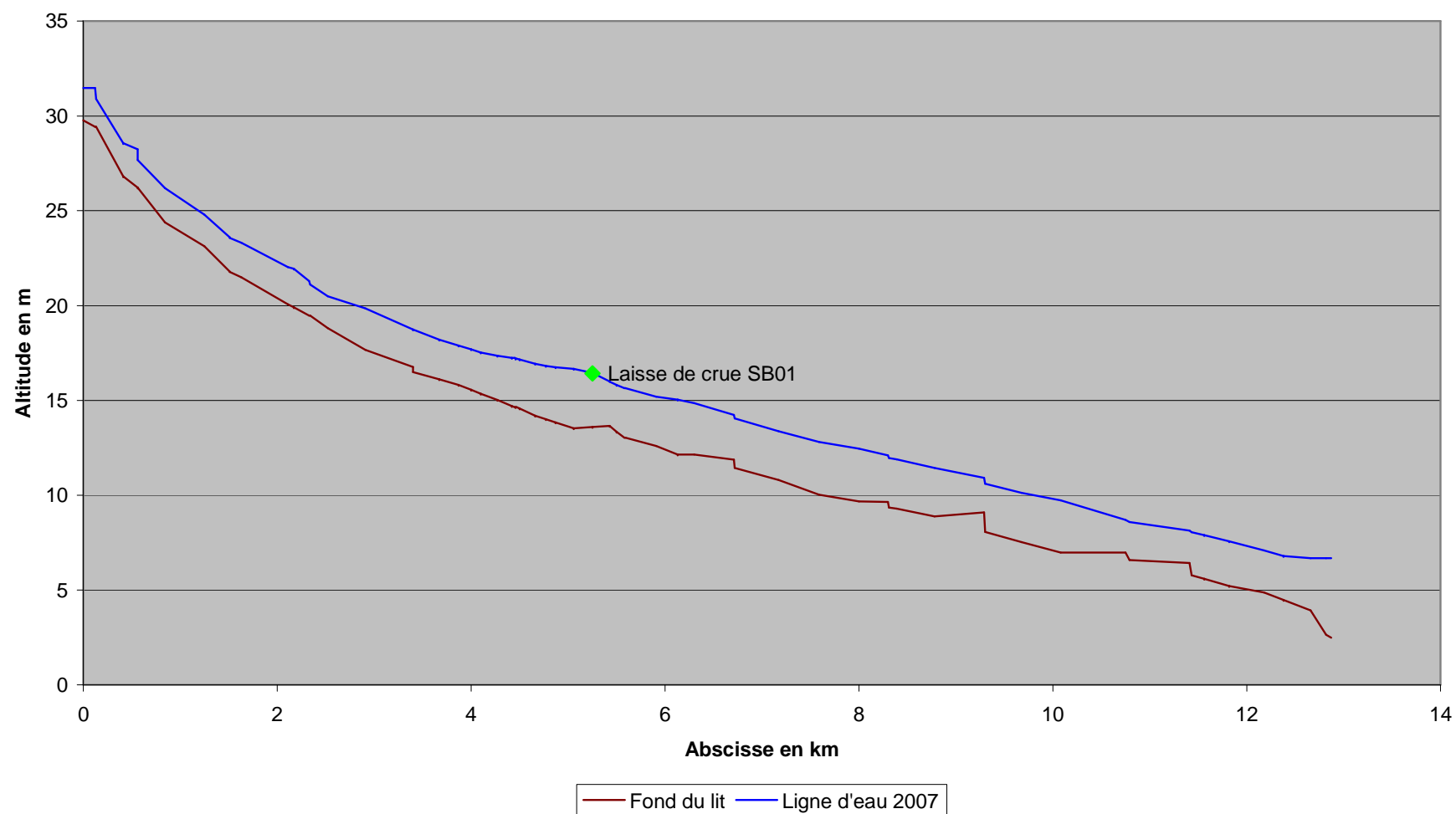
Profil en long de la Peene Becque



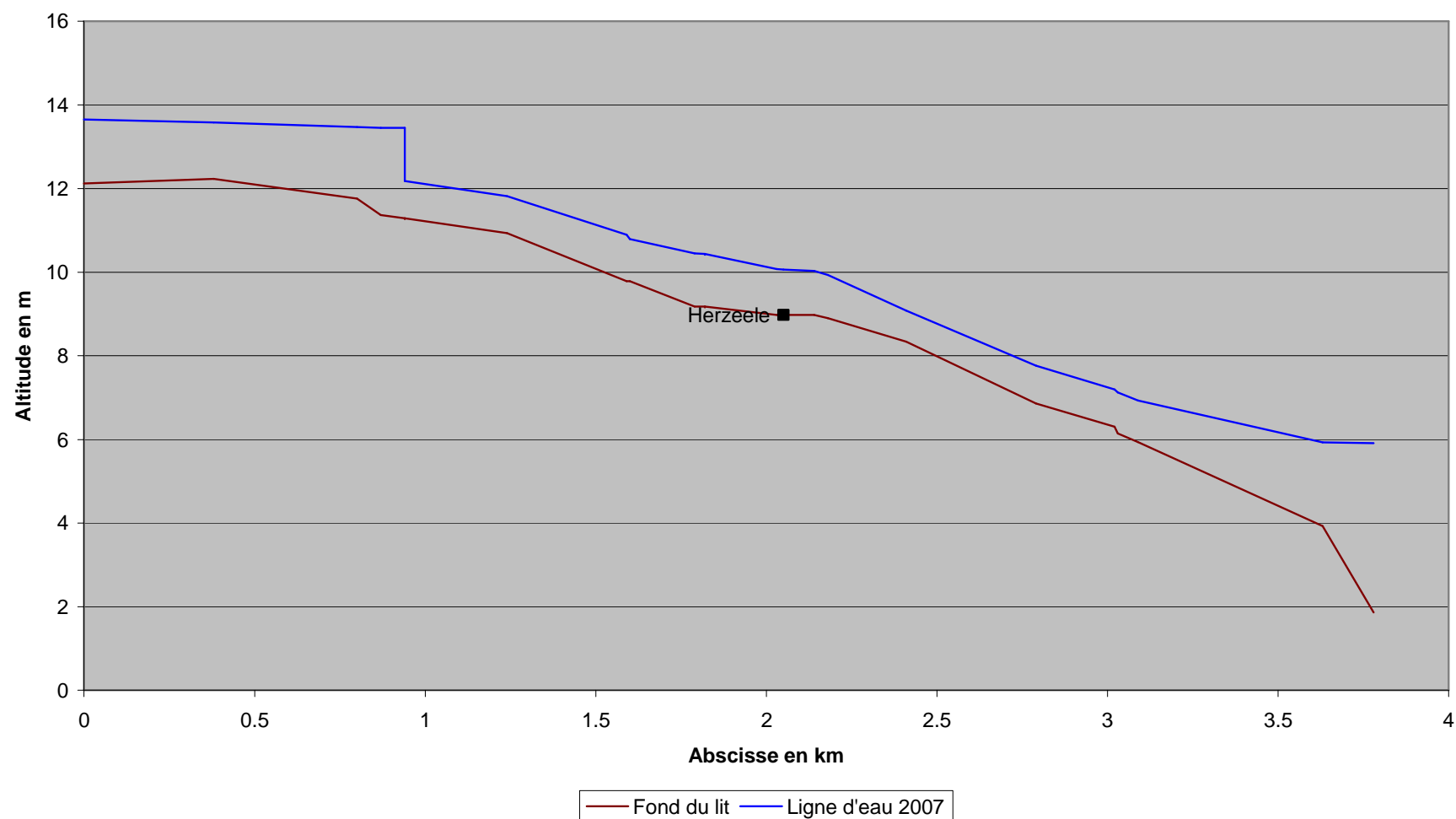
Profil en long de la Cray Becque



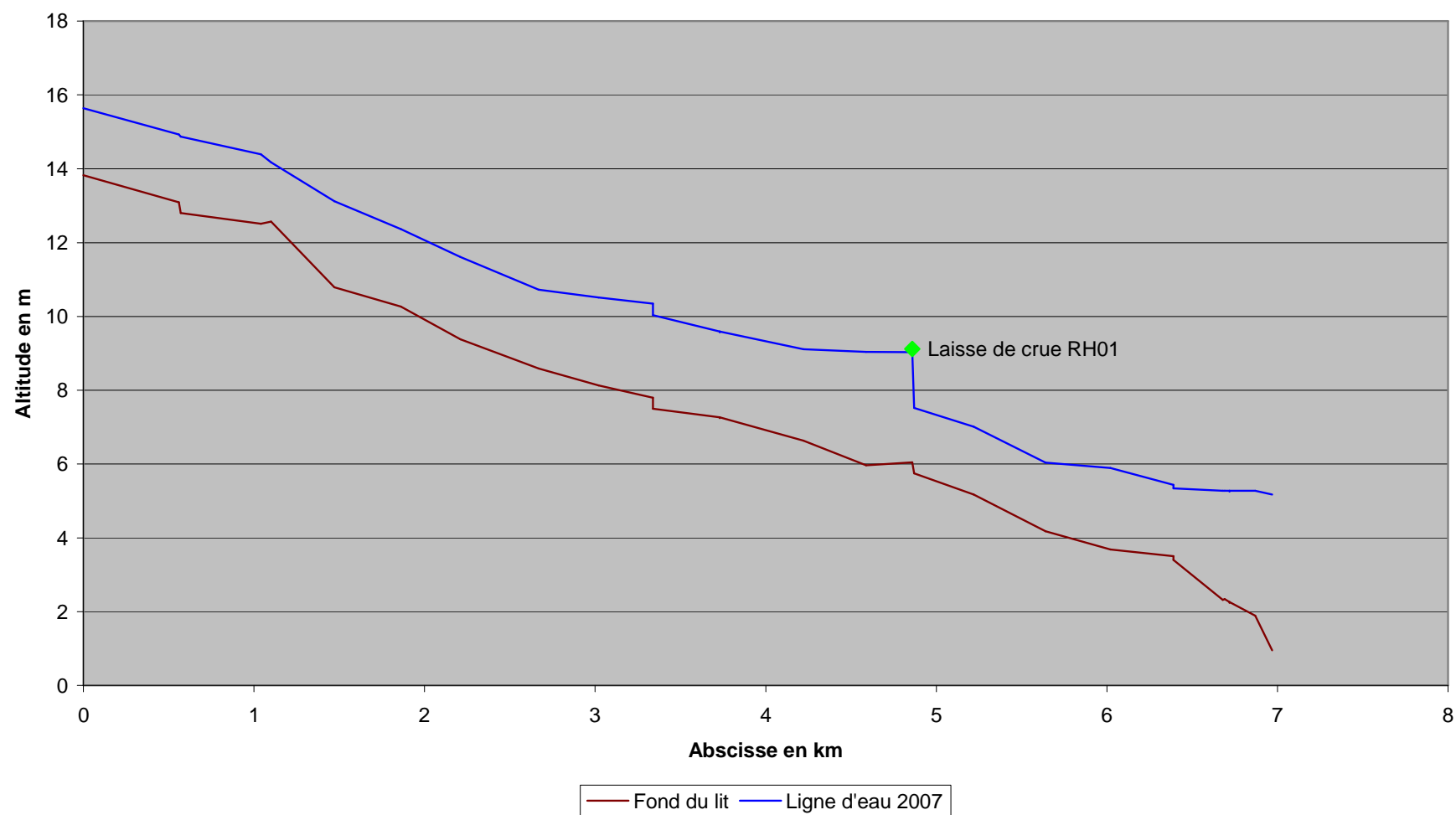
Profil en long de la Sale Becque



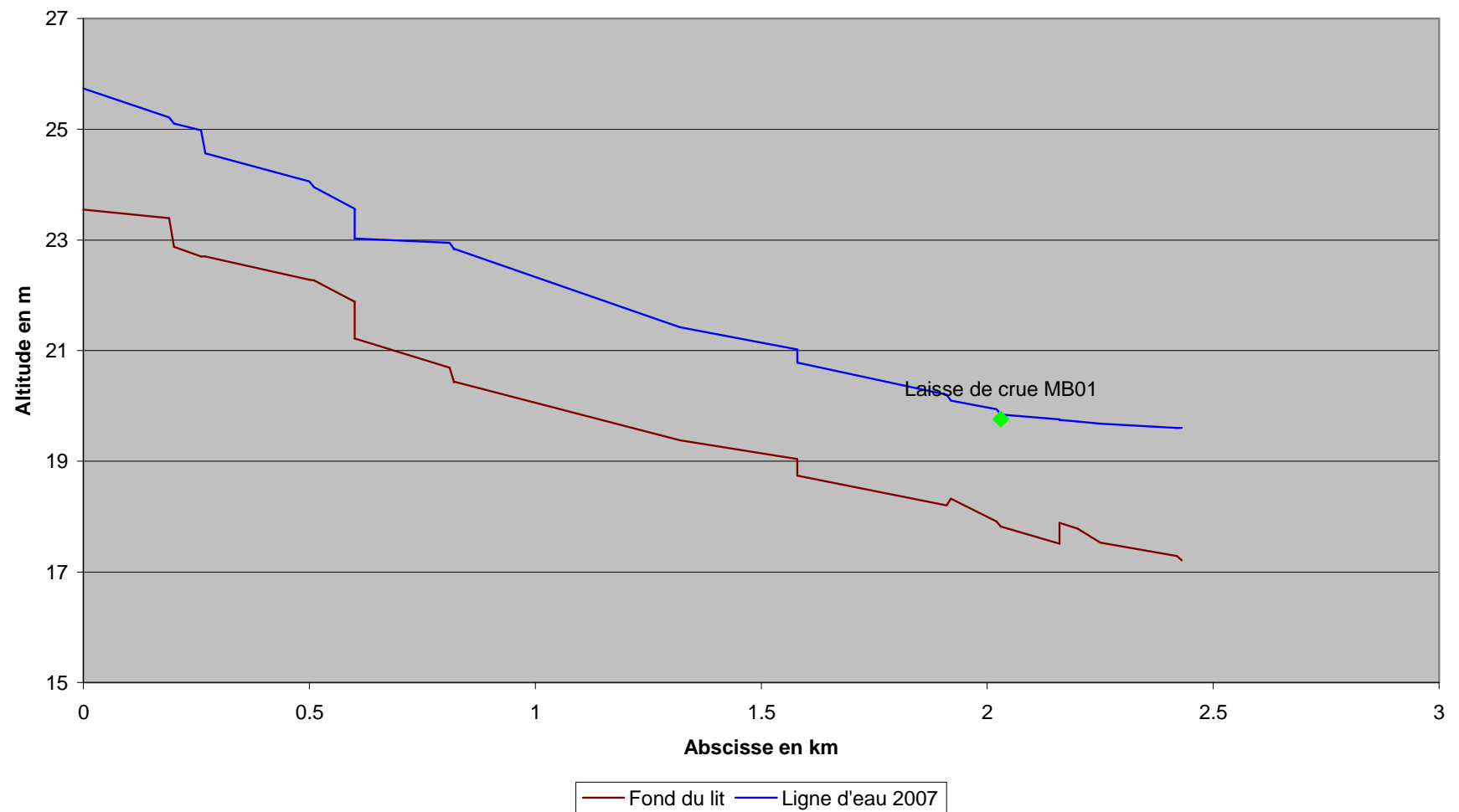
Profil en long de la Petite Becque



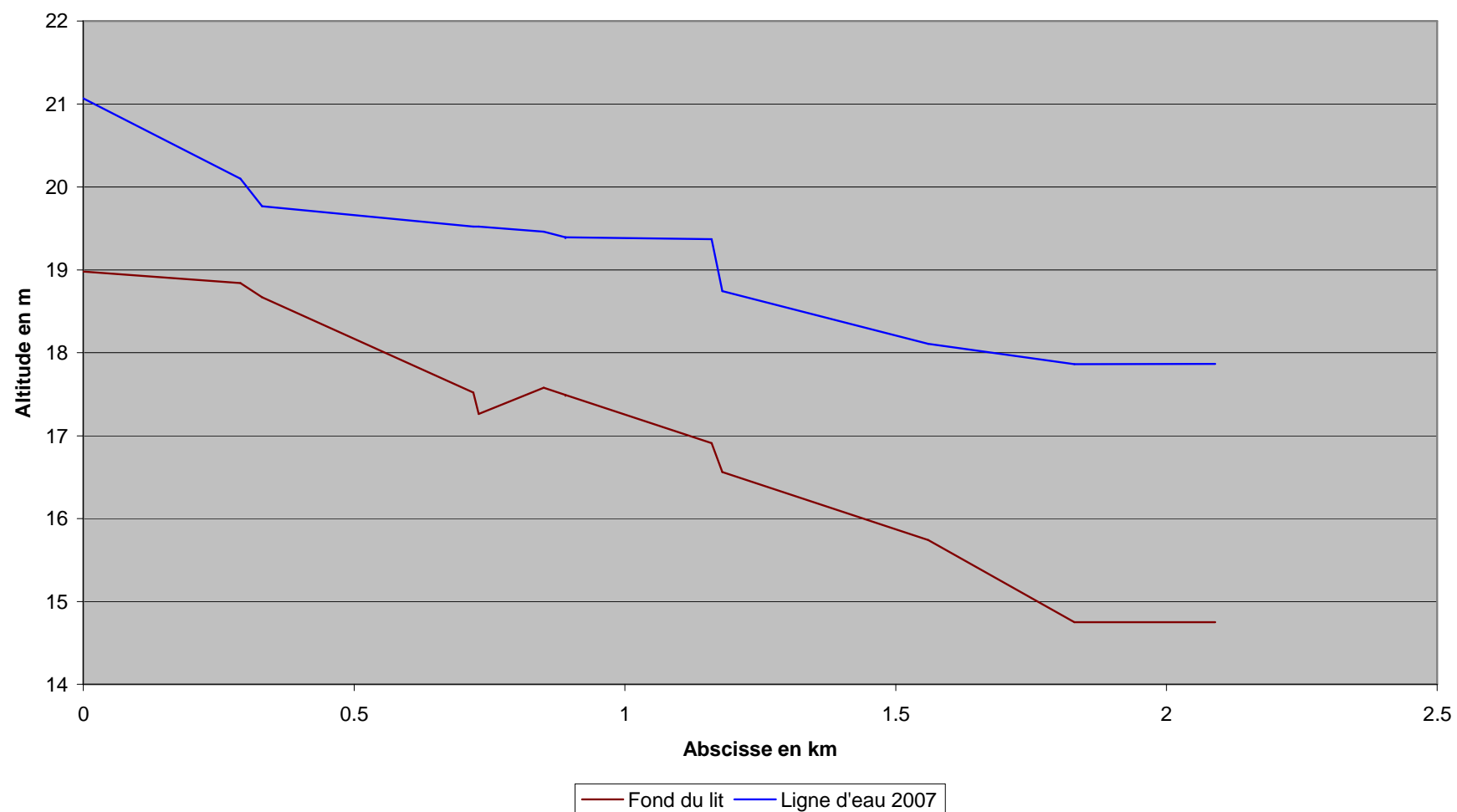
Profil en long du ruisseau d'Houtkerque



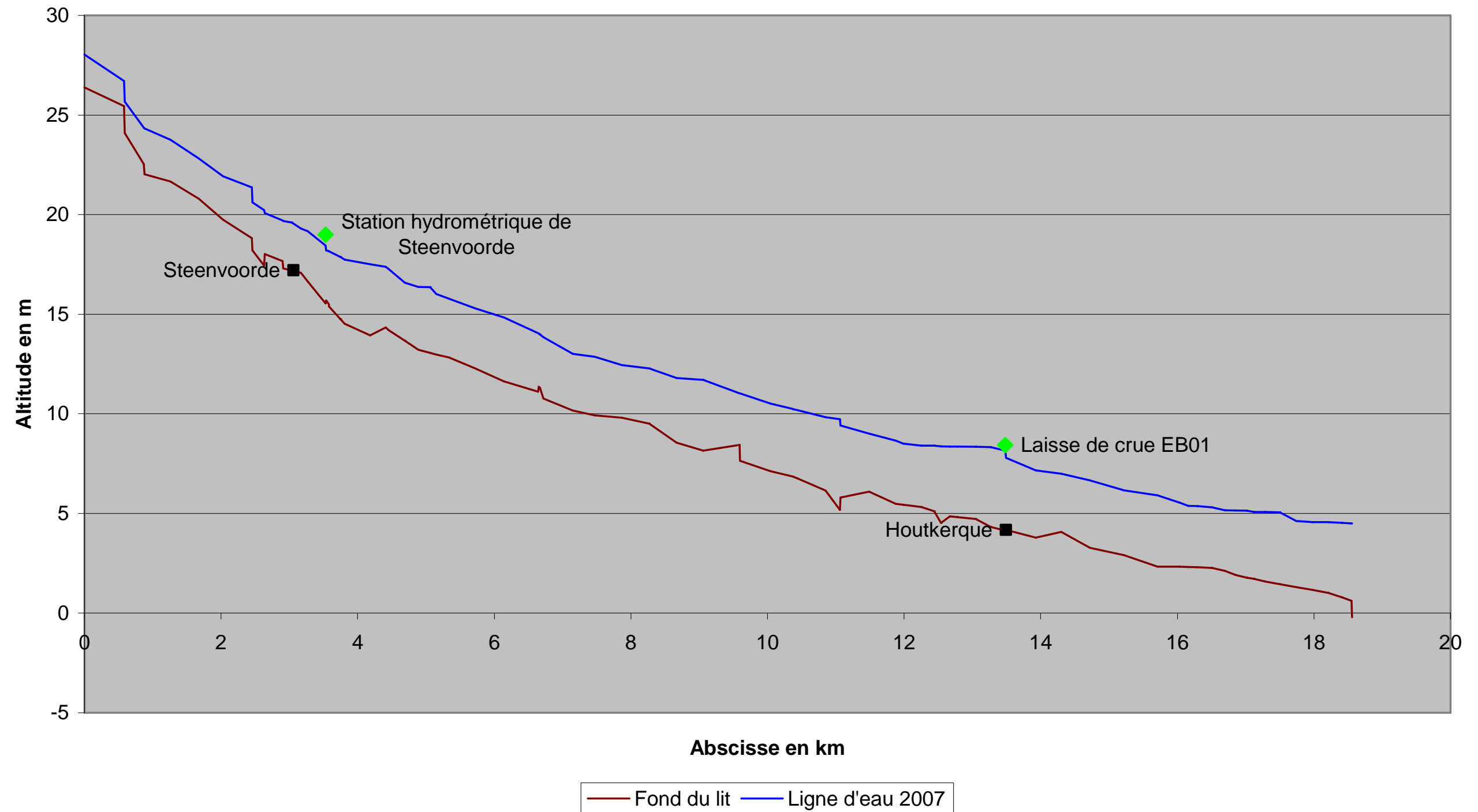
Profil en long de la Moe Becque



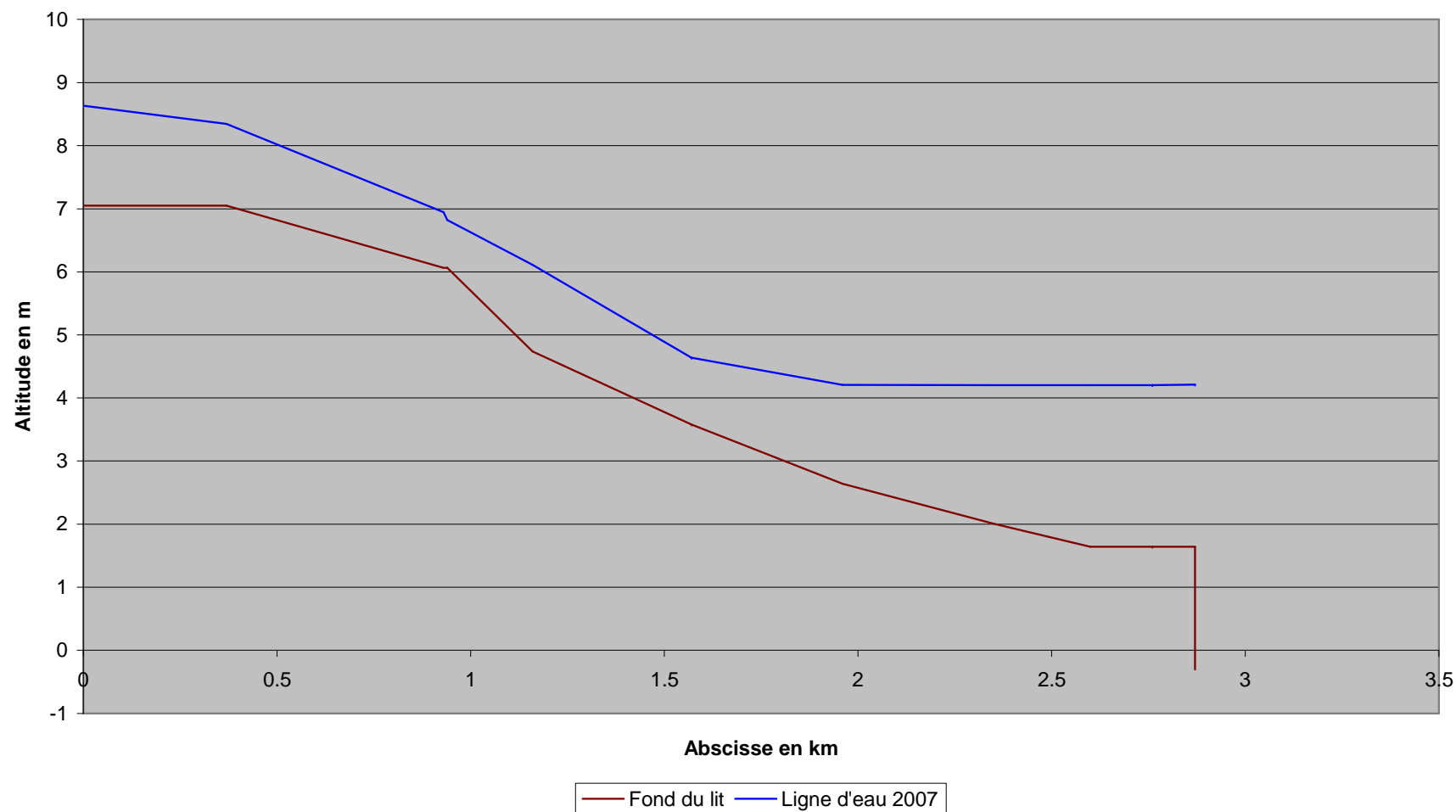
Profil en long de la Rommel Becque



Profil en long de l'Ey Becque



Profil en long de la Zwyne Becque



Ces différents profils en long mettent en évidence une bonne cohérence entre les niveaux calculés et les laisses de crue obtenues pour la crue de juillet 2007.

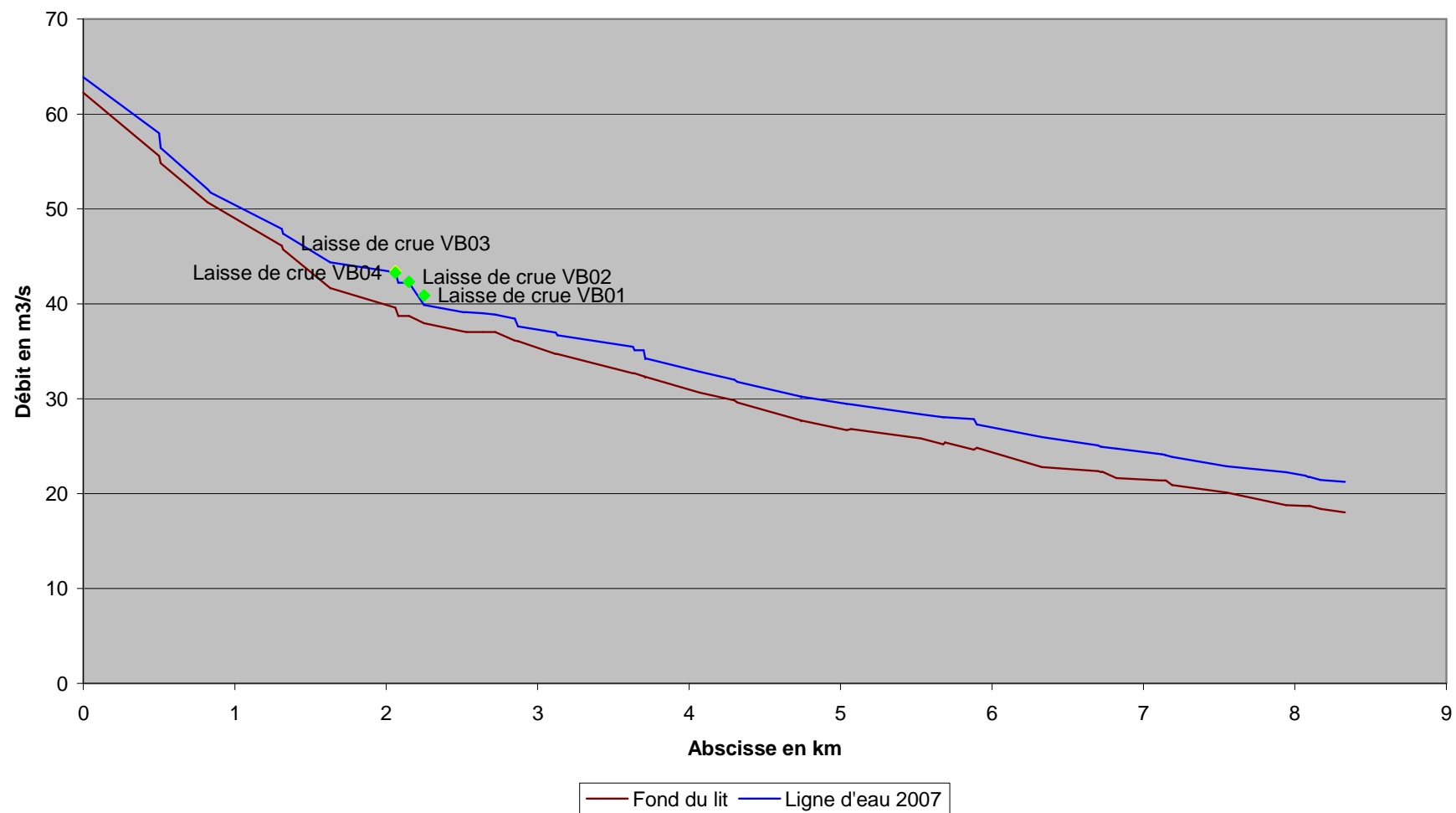
On remarque toutefois des écarts entre la ligne d'eau calculée et les laisses de crue sur l'Ey Becque. Divers tests de sensibilité ont été faits sur les coefficients de rugosité, ainsi que sur les pertes de charge singulières. Celles-ci n'ont pas donné satisfaction. Il semble donc que les hydrogrammes introduits ne soient pas satisfaisants, notamment au niveau des sous-bassins versants élémentaires E04 et E05. En effet, ces sous-bassins versants sont situés dans le secteur où a sévi la partie la plus intense de la cellule orageuse. Il est probable que la pluviométrie y a été différente et plus intense que celle mesurée à la station pluviométrique de Steenvoorde. Sous-estimer la pluviométrie conduit automatiquement à sous-estimer les hydrogrammes d'apport, et donc les hauteurs d'eau obtenues. Malgré cela, et vu les résultats obtenus sur le reste du bassin versant de l'Yser, le calage sur les hauteurs d'eau est dans l'ensemble satisfaisant.

La cartographie des zones inondées sur le bassin versant de l'Yser en France, lors de la crue de juillet 2007, est fournie en annexe 22.

B. Bassin versant de la Vleter Becque

Les profils en long ci-après présentent d'une part les laisses reconstituées de la crue de 2007, d'autre part la ligne d'eau calculée par le modèle hydraulique dans le cadre du calage.

Profil en long de la Vleter Becque



Ces différents profils en long mettent en évidence une bonne cohérence entre les niveaux calculés et les laisses de crue obtenues pour la crue de juillet 2007.

Seule la laisse de crue VB01 n'est pas atteinte, mais vu sa localisation à l'aval de Godewaersvelde, à proximité de la sortie de l'ouvrage faisant passer la Vleter Becque sous les habitations, il semble que le modèle hydraulique ne parvient pas à reproduire fidèlement la perte de charge dans cette zone.

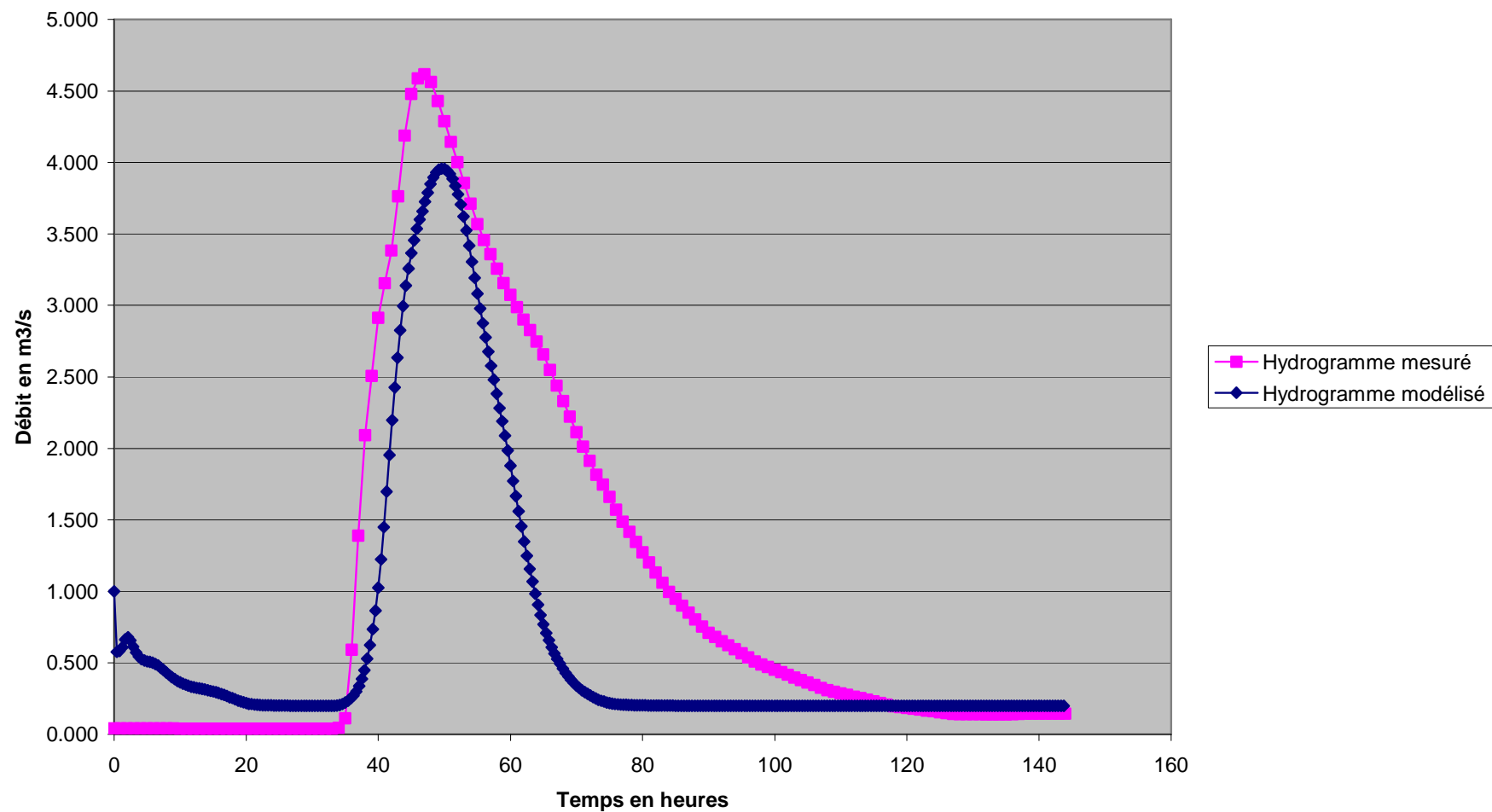
La cartographie des zones inondées sur le bassin versant de la Vleter Becque, lors de la crue de juillet 2007, est fournie en annexe 23.

3.1.5.2.2. *ANALYSE DES DEBITS OBTENUS*

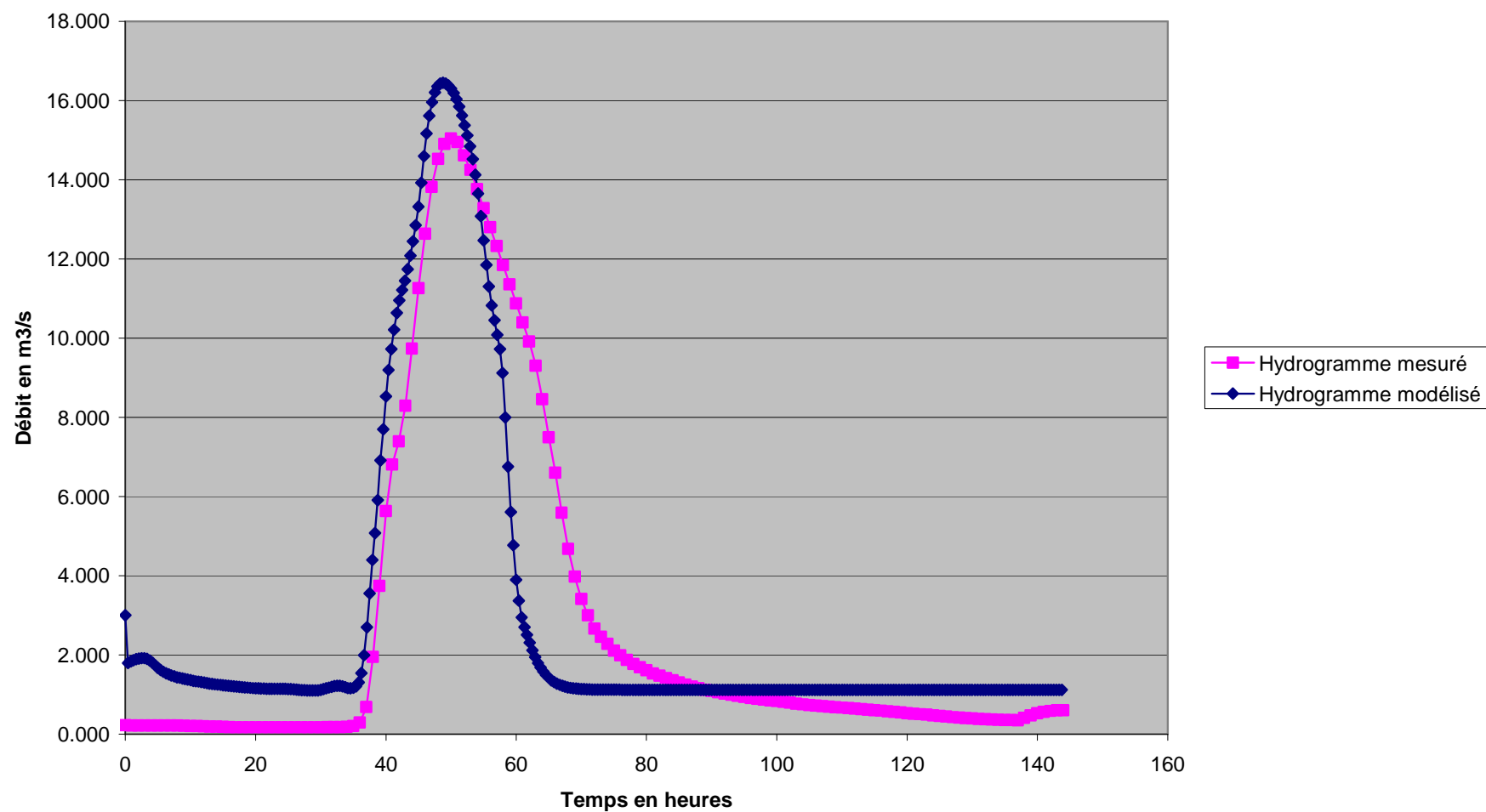
A. Bassin versant de l'Yser

Les hydrogrammes obtenus aux différentes stations hydrométriques sont présentés dans les pages qui suivent.

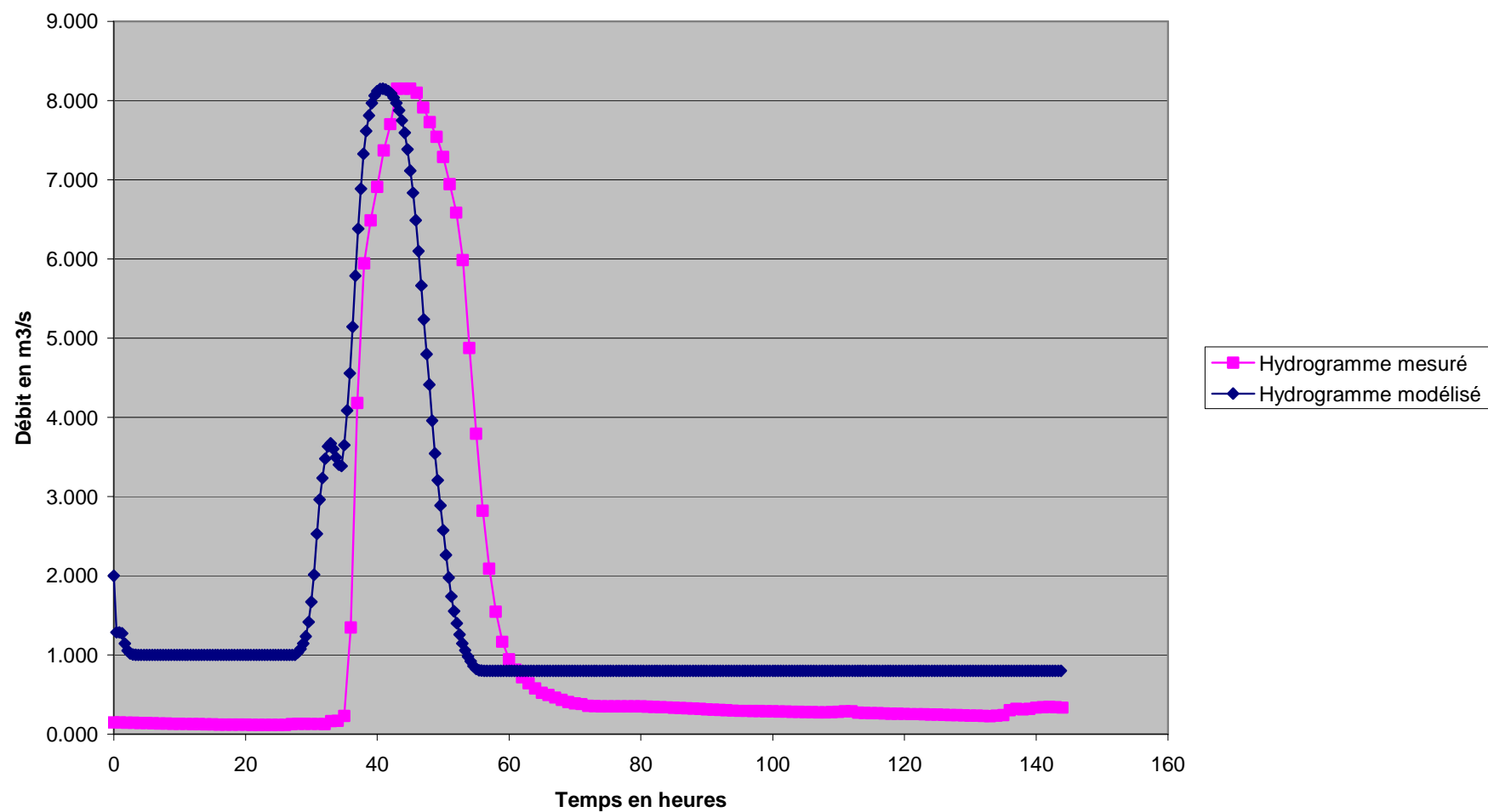
Station hydrométrique de Bollezeele - crue de juillet 2007



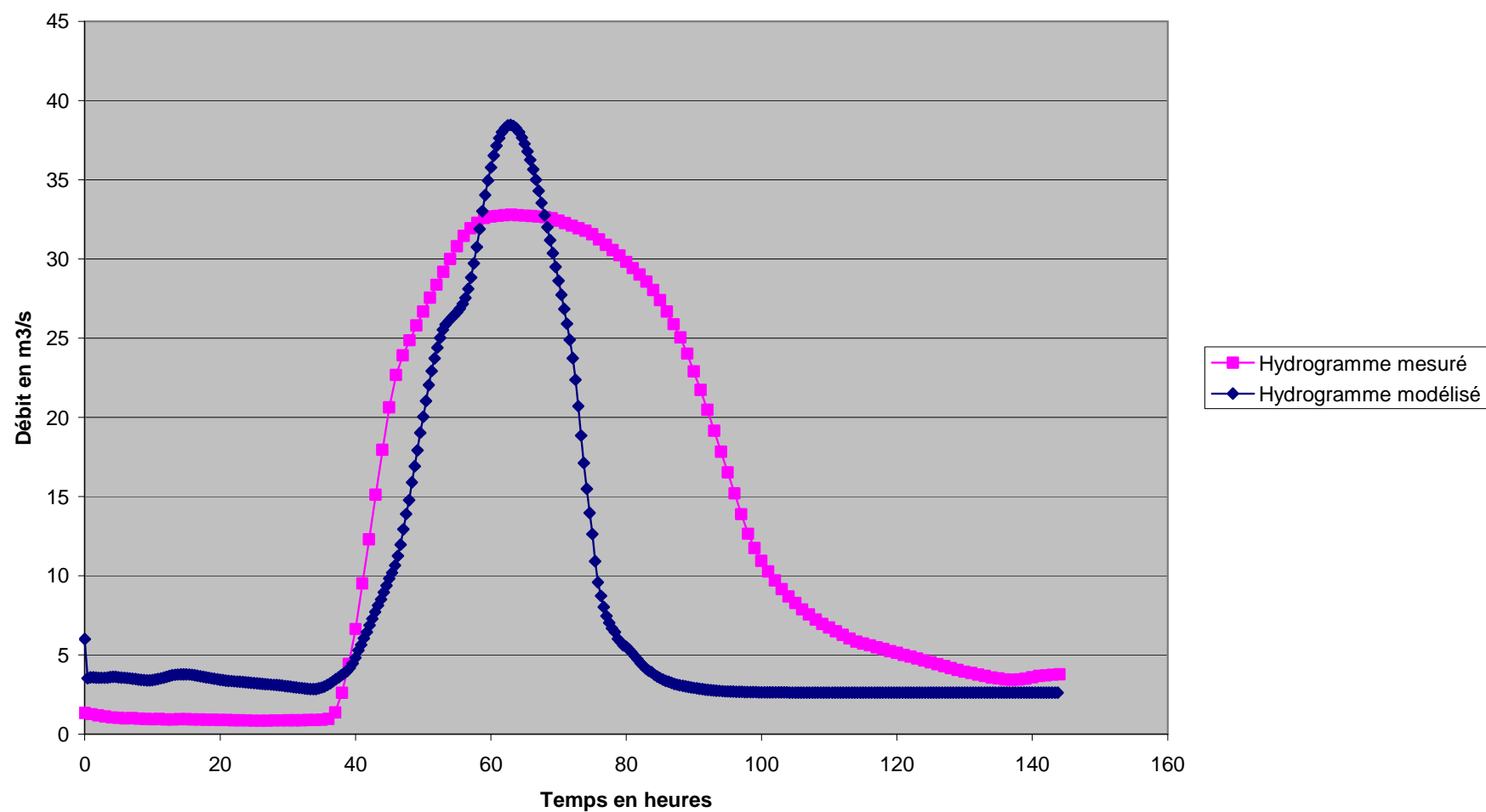
Station hydrométrique d'Ochtezeele - crue de juillet 2007



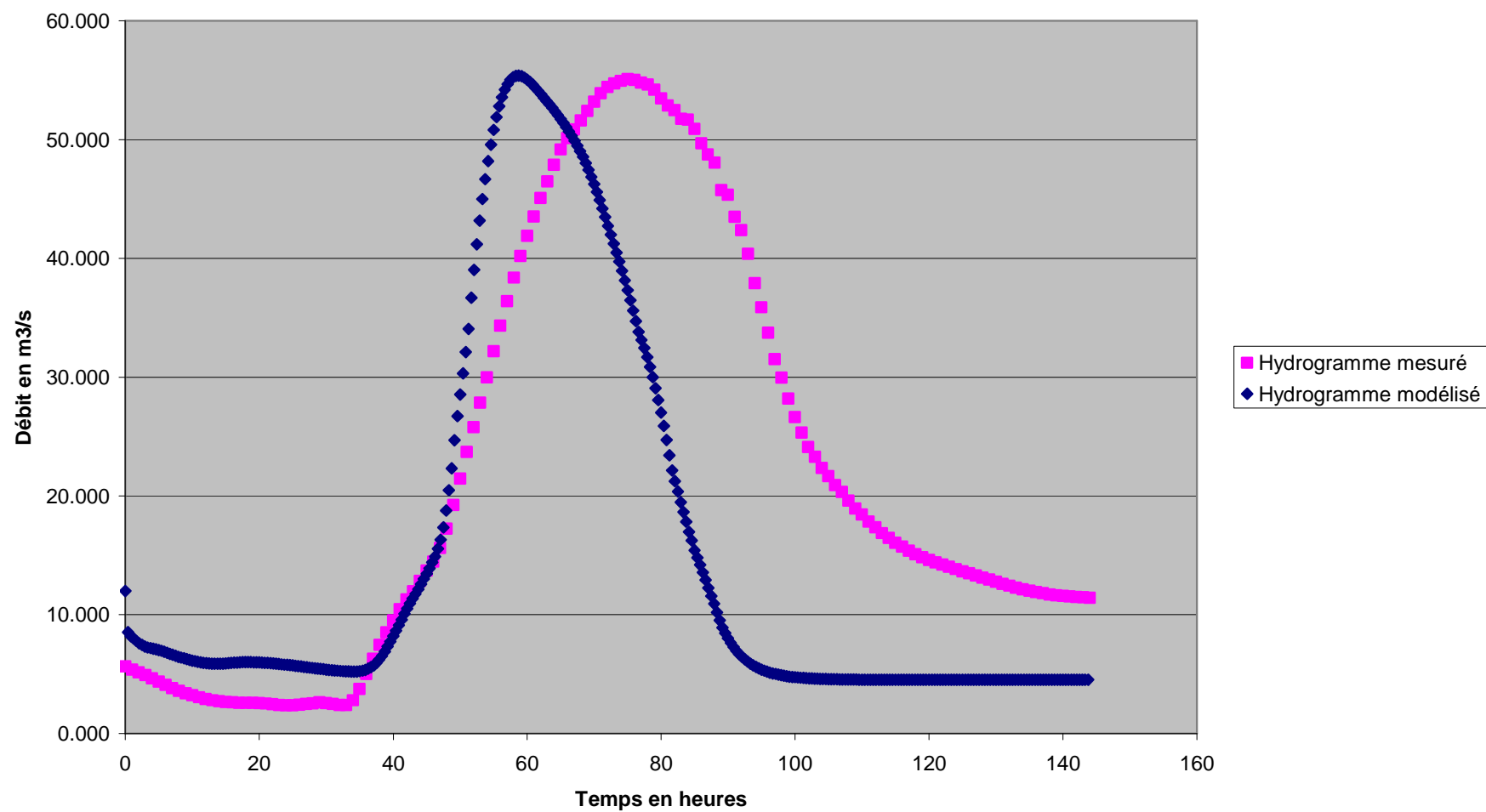
Station hydrométrique de Steenvoorde - crue de juillet 2007



Station hydrométrique de Bambecque - crue de juillet 2007



Station hydrométrique de Roesbrugge - crue de juillet 2007



On constate que les temps de montée en crue sont relativement similaires entre les hydrogrammes mesurés et modélisés, hormis pour la station hydrométrique de Roesbrugge. Entre les stations hydrométriques de Bambecque et de Roesbrugge, les principaux apports à l'Yser proviennent du ruisseau d'Houtkerque et surtout de l'Ey Becque. L'hypothèse faite précédemment sur la pluviométrie prise en compte sur ces cours d'eau, et notamment sur l'Ey Becque, semble se confirmer. En effet, les résultats chronologiques obtenus sont cohérents avec ce qui a été mesuré jusqu'à Bambecque, puis suite aux apports de l'Ey Becque les résultats diffèrent. La pluie orageuse sur le bassin versant de l'Ey Becque a probablement eu une chronologie légèrement différente de celle enregistrée à la station de Steenvoorde.

A propos des hydrogrammes, ils ne sont pas vraiment comparables sur leurs temps de base du fait du défaut d'évacuation de l'Yser à la mer. Pour la même raison, les volumes de crue modélisés et mesurés ne peuvent être comparés.

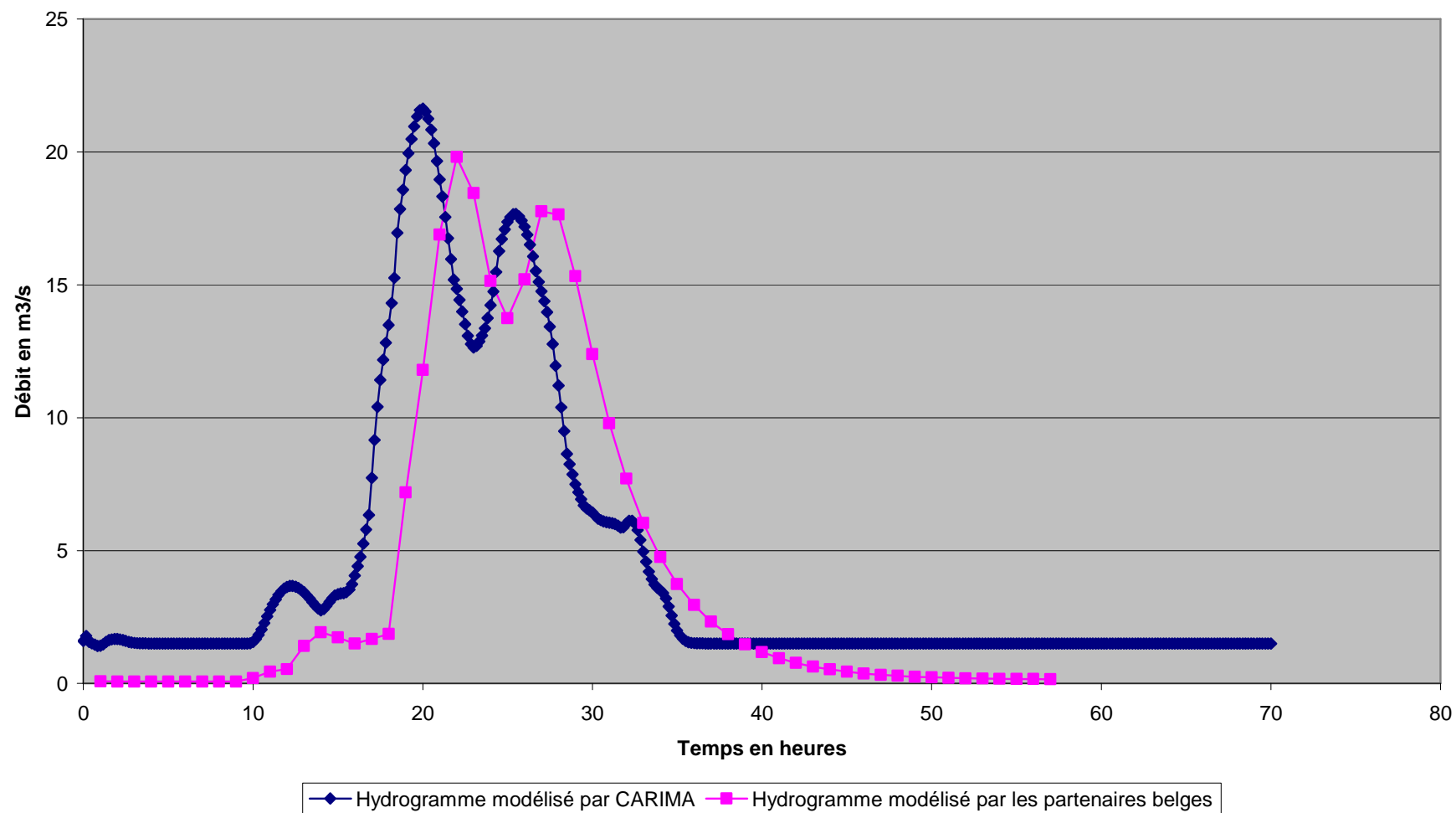
Stations hydrométriques	Débit de pointe mesuré en m ³ /s	Débit de pointe modélisé en m ³ /s	Ecart
Bollezeele	4.62	3.96	-14%
Ochtezeele	15.1	16.45	+9%
Steenvoorde	8.15	8.15	0%
Bambecque	32.8	38.47	+17%
Roesbrugge	55.09	55.4	+1%

On constate par ailleurs que les débits de pointe obtenus pour l'événement de calage sont dans l'ensemble cohérents avec les débits de pointe mesurés aux différentes stations hydrométriques en juillet 2007. L'écart au niveau de la station hydrométrique de Bambecque n'est pas pleinement satisfaisant même s'il reste tolérable, mais là encore les variations locales de la pluviométrie orageuse peuvent expliquer cela : il est très possible que la pluviométrie enregistrée à la station de Steenvoorde soit supérieure aux précipitations réellement survenues sur la Cray Becque par exemple.

B. Bassin versant de la Vleter Becque

L'hydrogramme obtenu en aval du tronçon modélisé est présenté ci-après, en parallèle de l'hydrogramme modélisé par les partenaires belges de l'étude.

Hydrogrammes à la confluence entre la Vleterbeek et la Winterbeek



L'allure générale des deux hydrogrammes est relativement cohérente (temps de base et temps de montée similaires).

Concernant le débit de pointe, les données fournies par les partenaires belges de l'étude indiquent un débit de pointe de 19,8 m³/s, tandis qu'avec le modèle CARIMA le débit de pointe obtenu est de 21,6 m³/s, soit un écart de 9% qui reste satisfaisant.

3.1.5.2.3. SYNTHÈSE SUR LE CALAGE

A. Bassin versant de l'Yser

- Les données sur la crue de juillet 2007 ont été utilisées pour effectuer le calage du modèle.
- Le calage du modèle est satisfaisant en terme de niveau et en terme de débit de pointe, même s'il apparaît que la pluviométrie est sous-estimée sur le bassin versant de l'Ey Becque.
- Le calage sur les volumes de crue et sur la durée de crue est moins satisfaisant (notamment à partir de la décrue) du fait du défaut d'évacuation de l'Yser à la mer.

B. Bassin versant de la Vleter Becque

- Les données sur la crue de juillet 2007 ont été utilisées pour effectuer le calage du modèle.
- Le calage du modèle est satisfaisant en terme de niveau et en terme de débit de pointe.
- Le calage sur les volumes de crue et sur la durée de crue est satisfaisant.

3.2. SIMULATIONS DES CRUES DE REFERENCE

Les crues de référence sont modélisées à partir des différentes pluies modélisées et des hydrogrammes que celles-ci restituent à l'exutoire de chaque sous-bassin versant. Elles sont ensuite cartographiées sur la base du modèle hydraulique calé.

Ainsi, les crues modélisées, d'une part dans le modèle hydraulique de l'Yser et de ses affluents en France, d'autre part dans le modèle hydraulique de la Vleter Becque, sont les suivantes :

- Événement hivernal :
 - Pluie de période de retour T = 2 ans
 - Pluie de période de retour T = 10 ans
 - Pluie de période de retour T = 20 ans
 - Pluie de période de retour T = 100 ans
- Événement estival :
 - Pluie de période de retour T = 2 ans
 - Pluie de période de retour T = 10 ans
 - Pluie de période de retour T = 20 ans

- Pluie de période de retour $T = 100$ ans

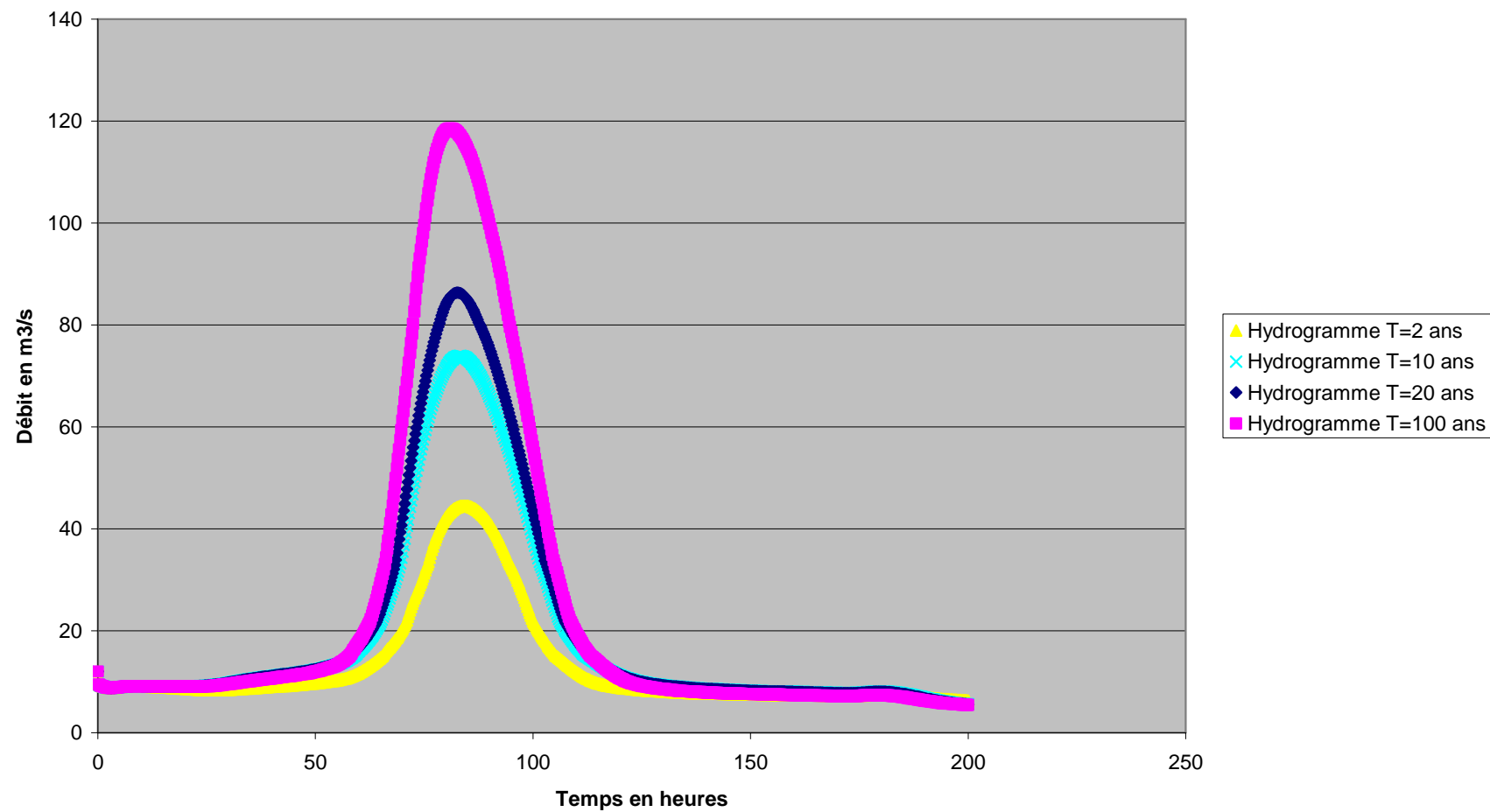
La pluviométrie prise en compte pour ces différents événements est déterminée à partir des coefficients de Montana de la station Lille Lesquin, fournis en annexe 24.

3.2.1. BASSIN VERSANT DE L'YSER

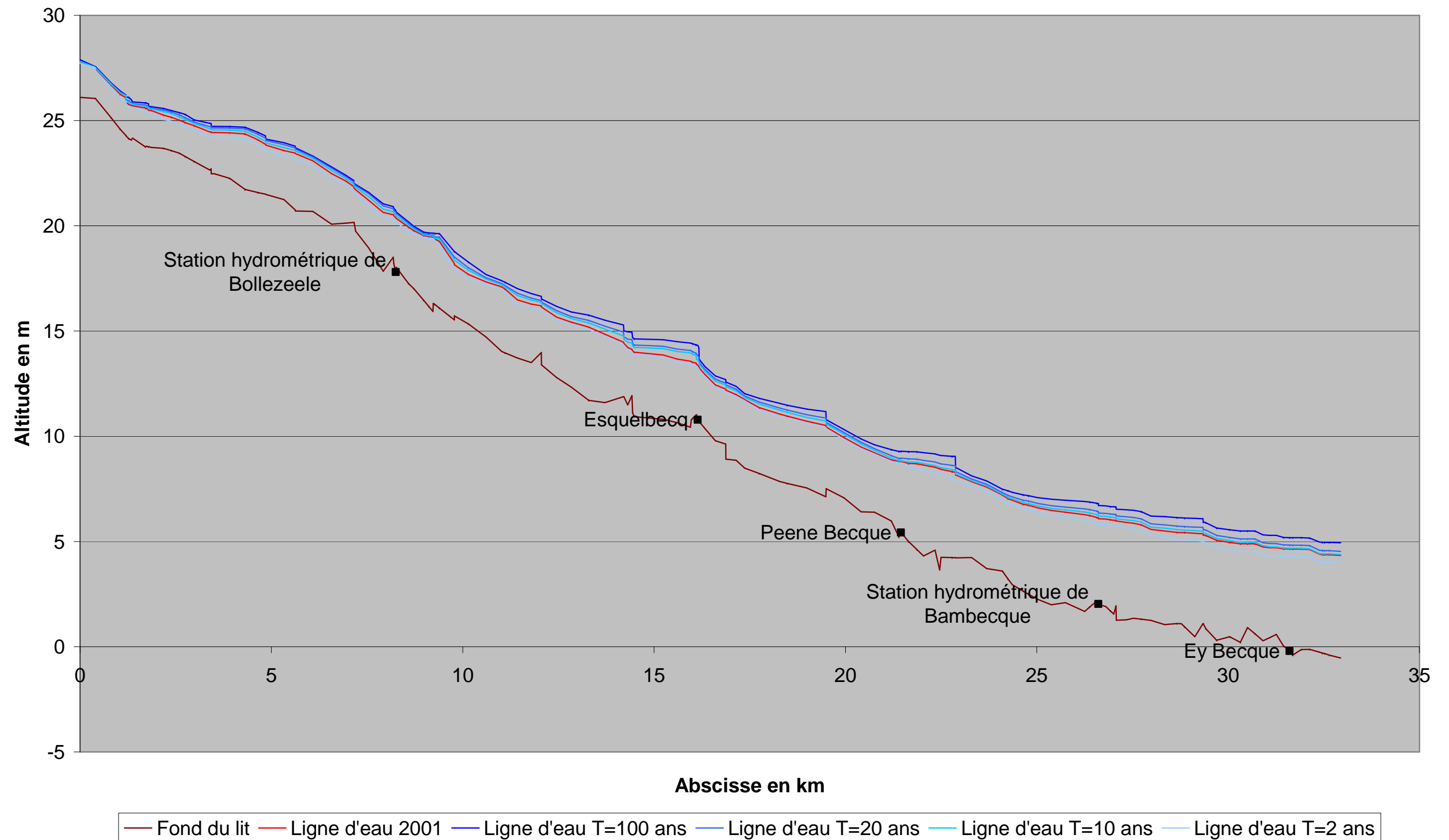
3.2.1.1. EVENEMENTS HIVERNAUX

Les hydrogrammes obtenus pour chaque période de retour au niveau de la station de Roesbrugge (aval du modèle), ainsi que les profils en long sur chaque affluent et pour chaque période de retour, sont présentés dans les pages qui suivent.

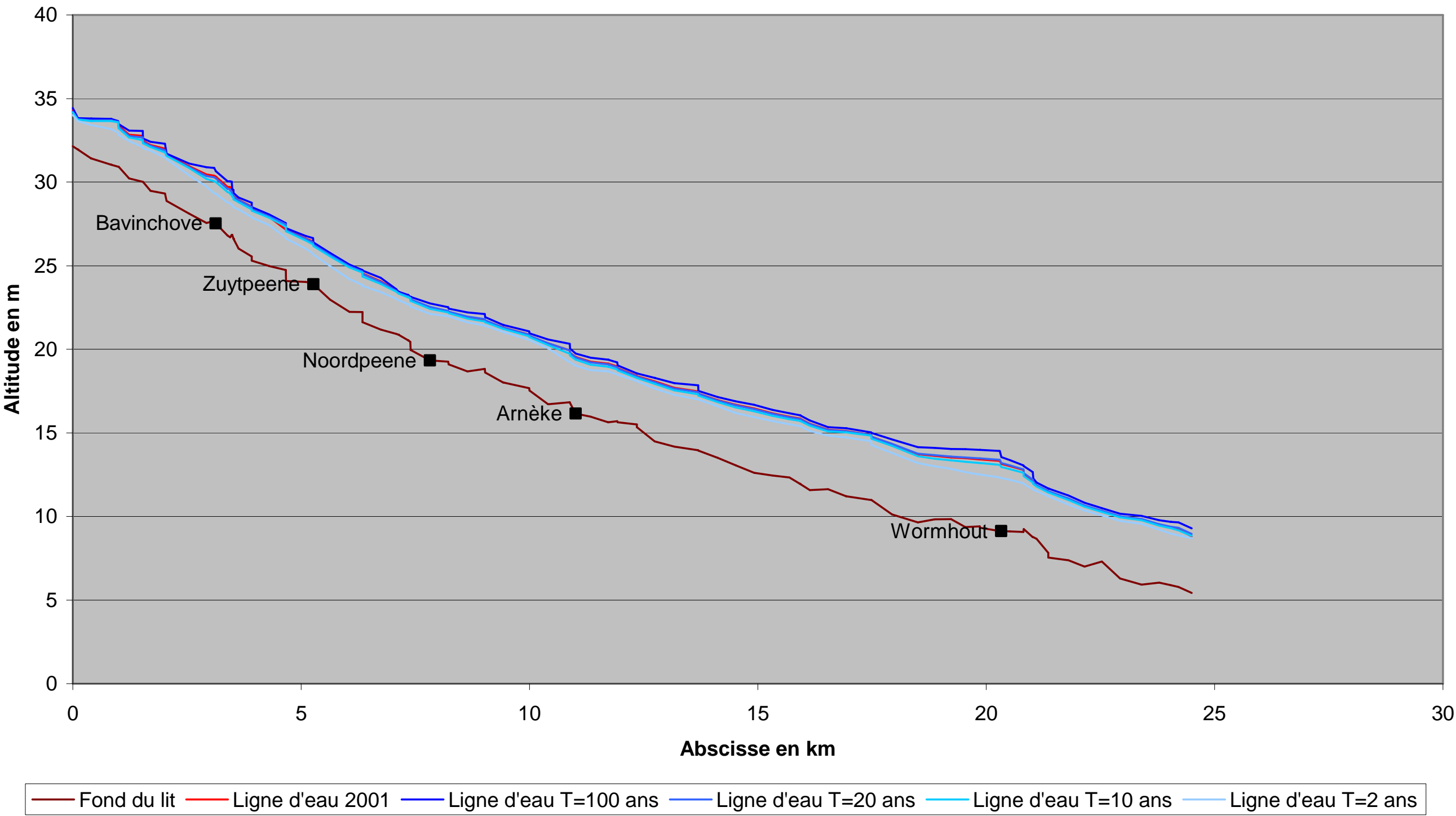
Hydrogrammes à la station de Roesbrugge - événements hivernaux



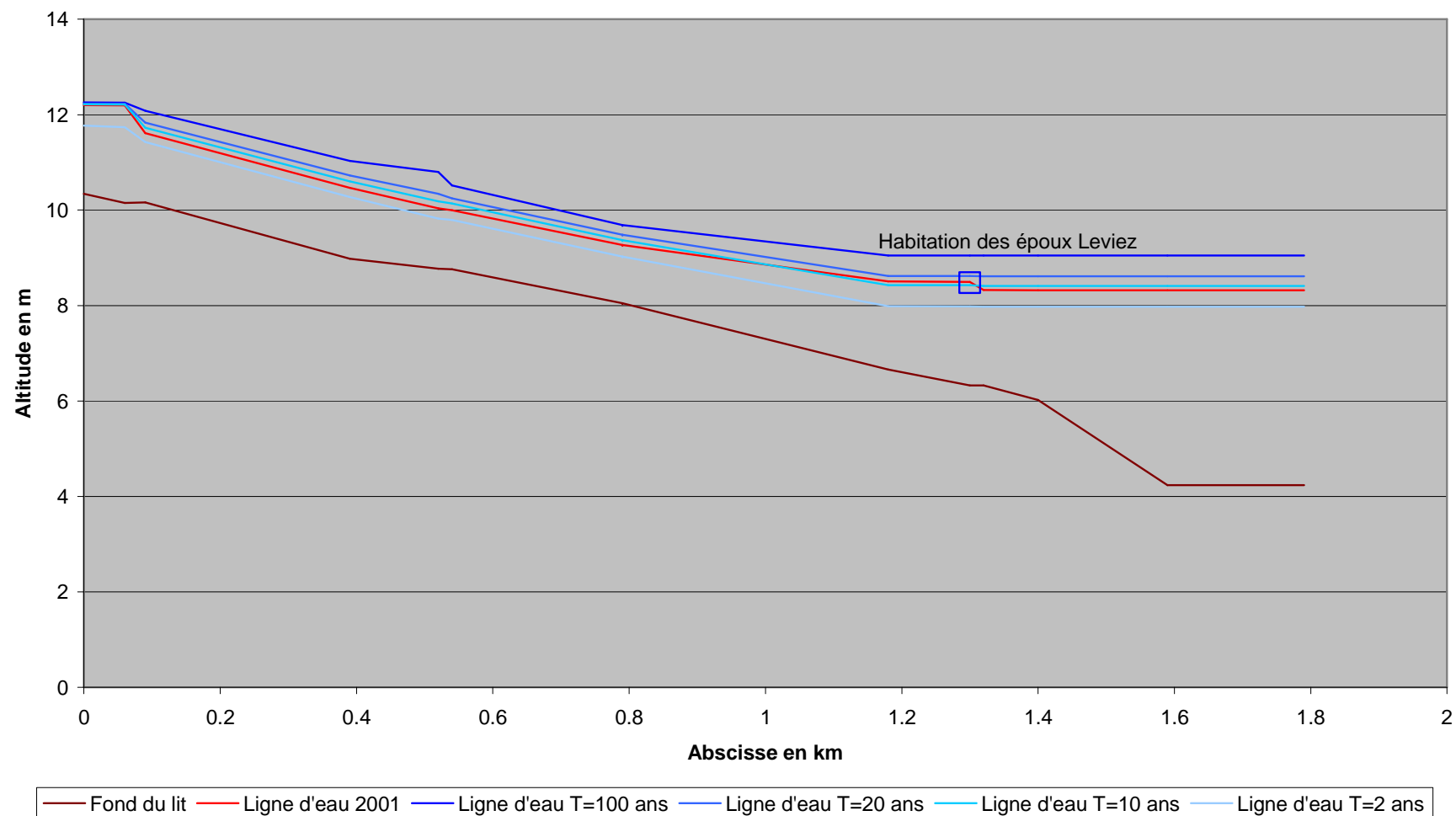
Profil en long de l'Yser



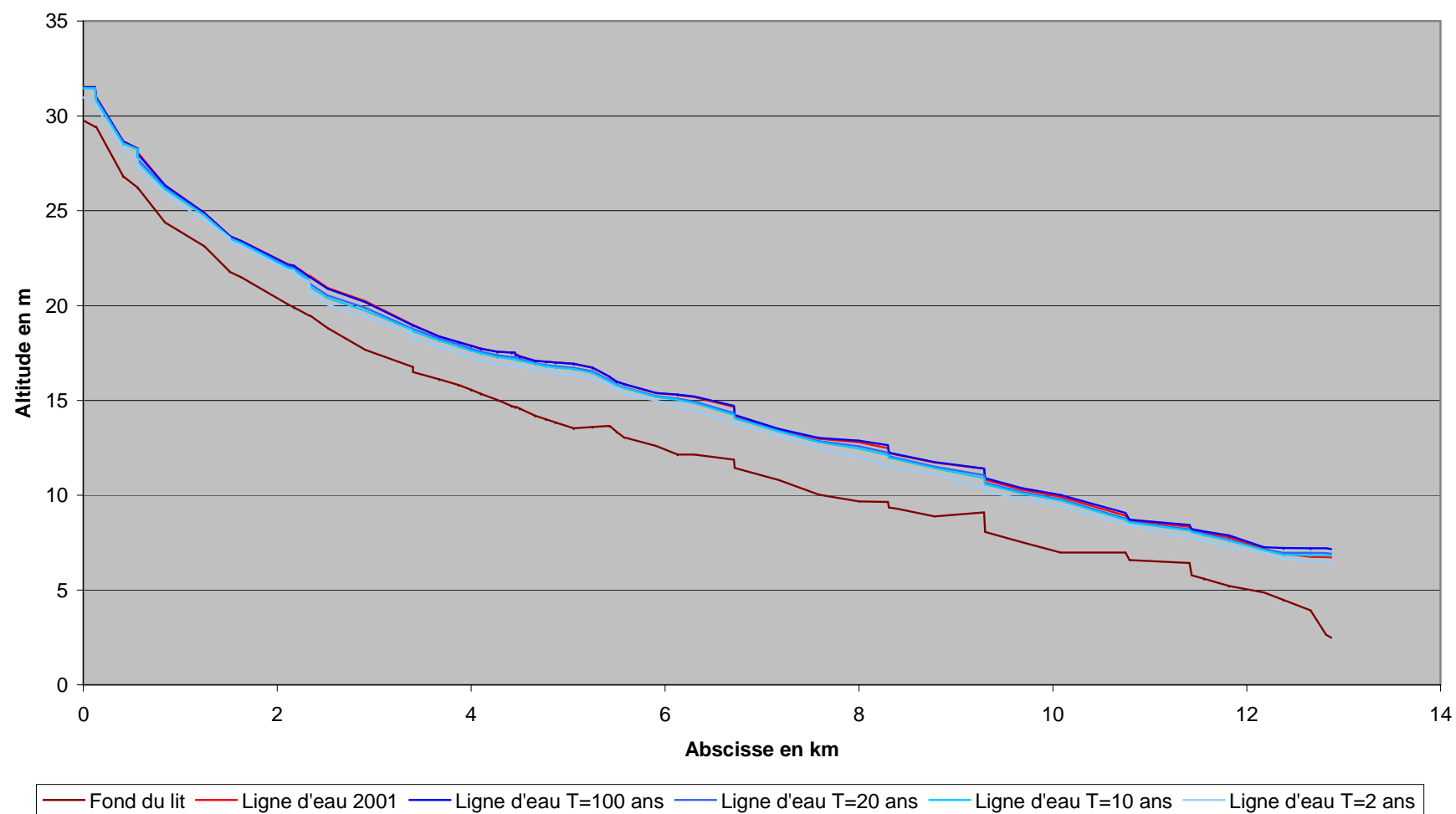
Profil en long de la Peene Becque



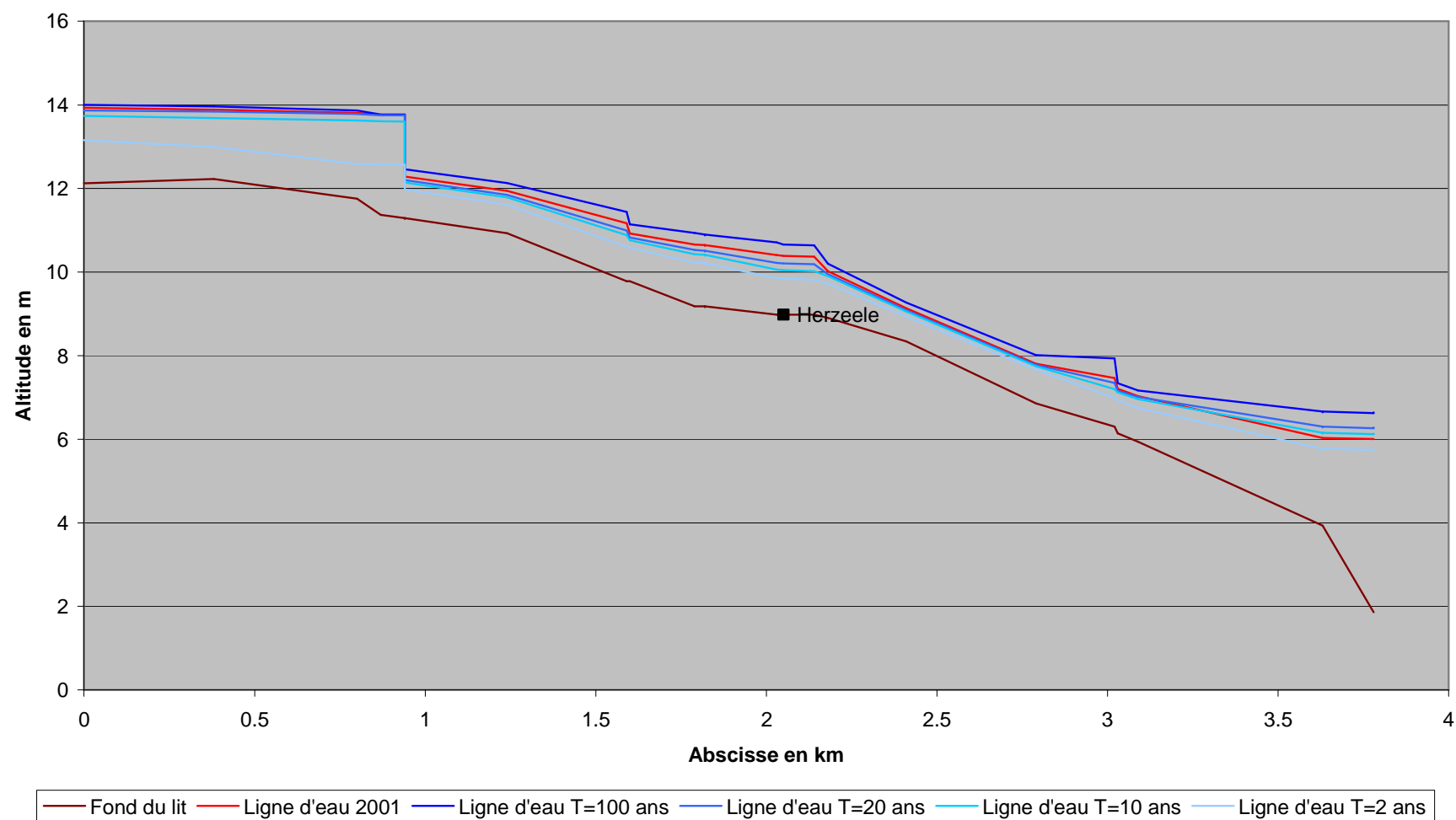
Profil en long de la Cray Becque



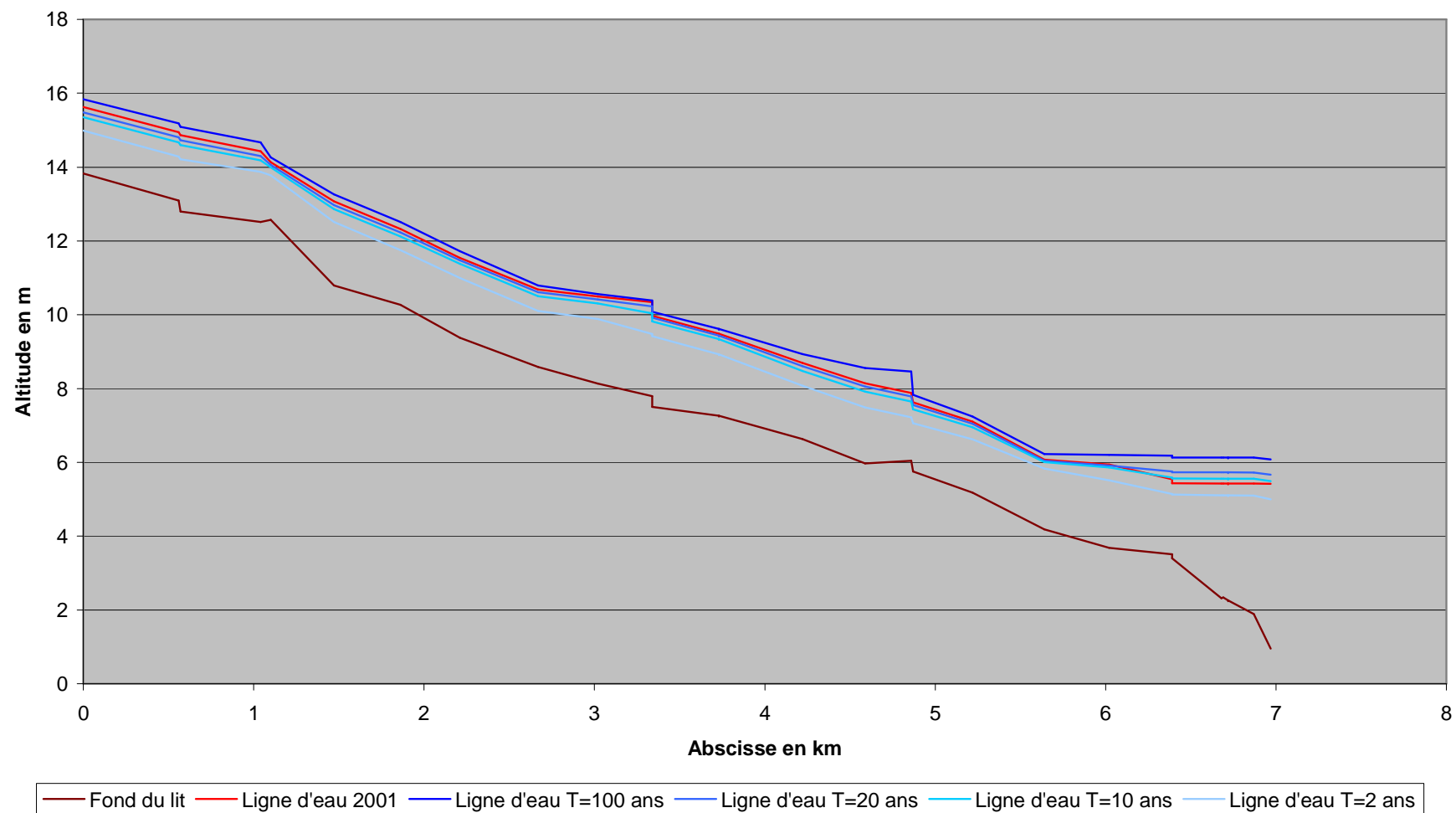
Profil en long de la Sale Becque



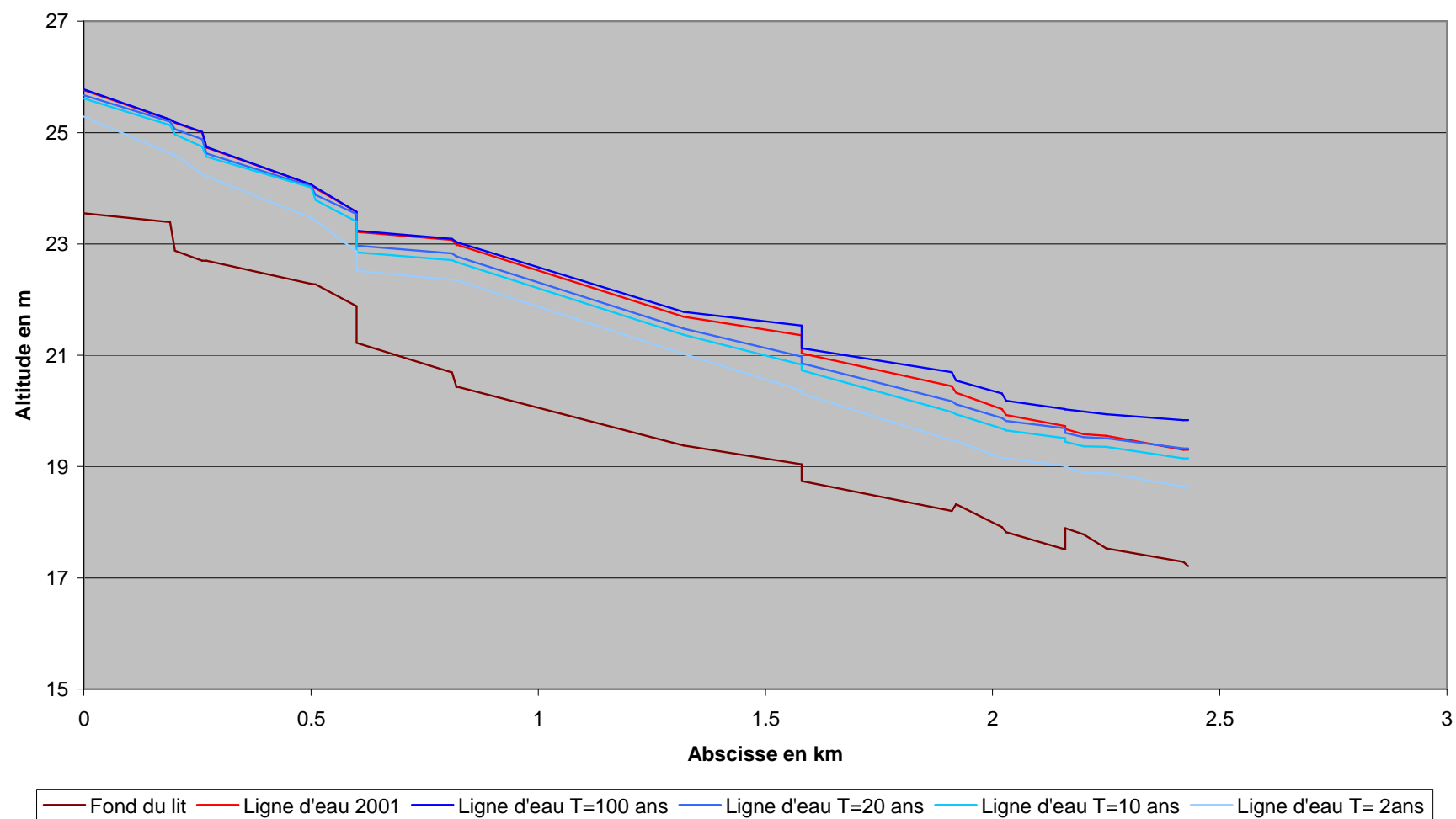
Profil en long de la Petite Becque



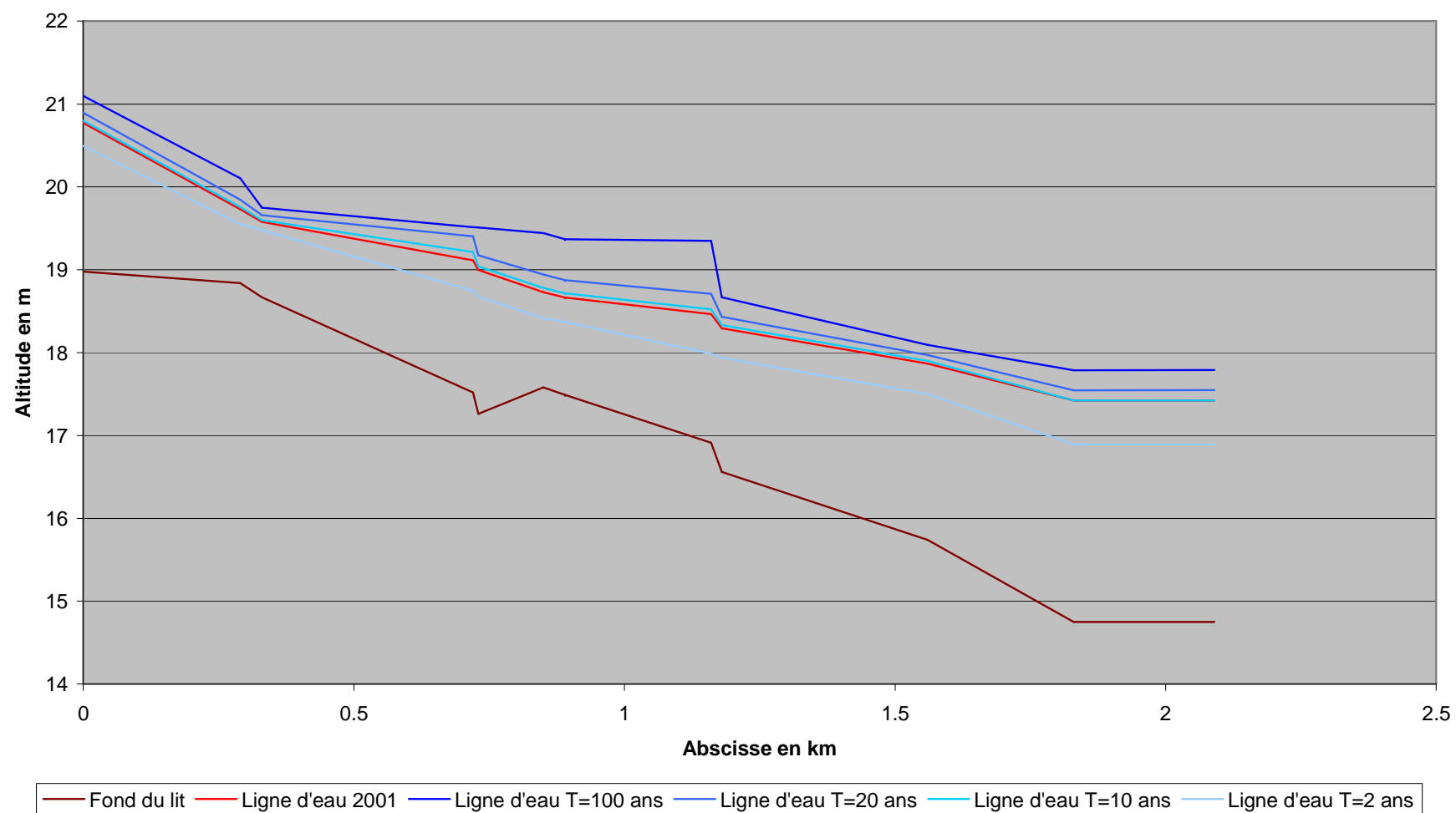
Profil en long du ruisseau d'Houtkerque



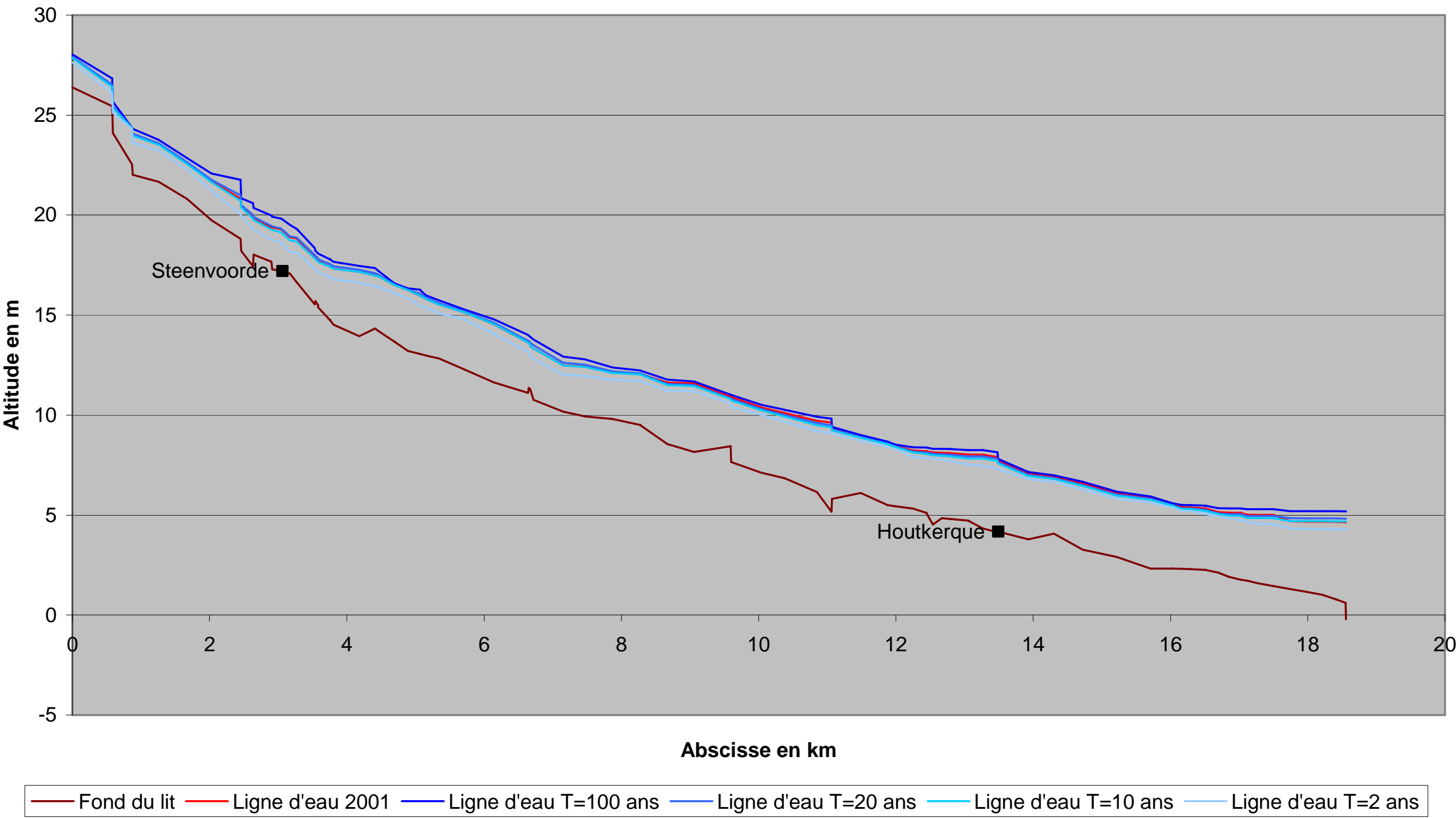
Profil en long de la Moe Becque



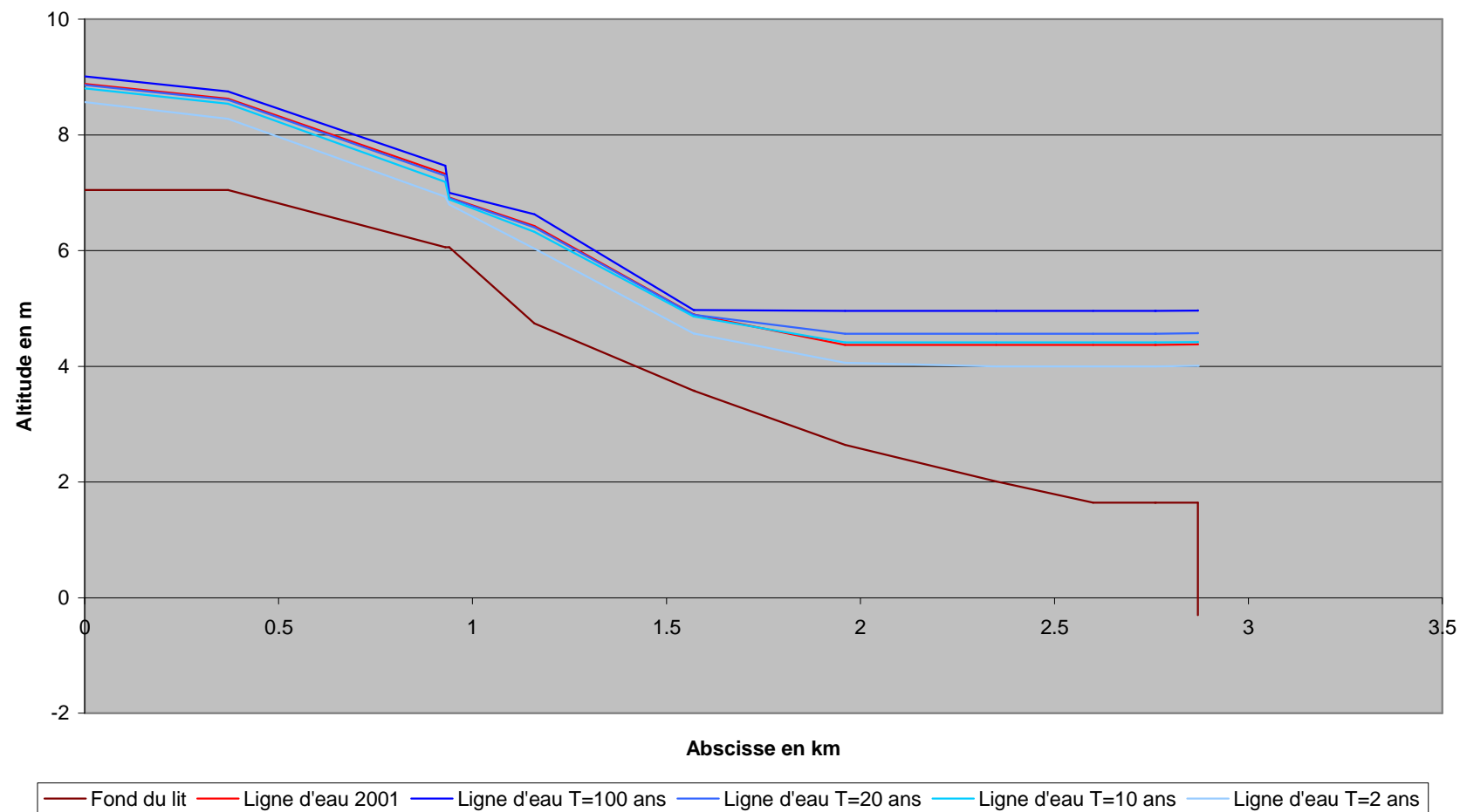
Profil en long de la Rommel Becque



Profil en long de l'Ey Becque



Profil en long de la Zwyne Becque



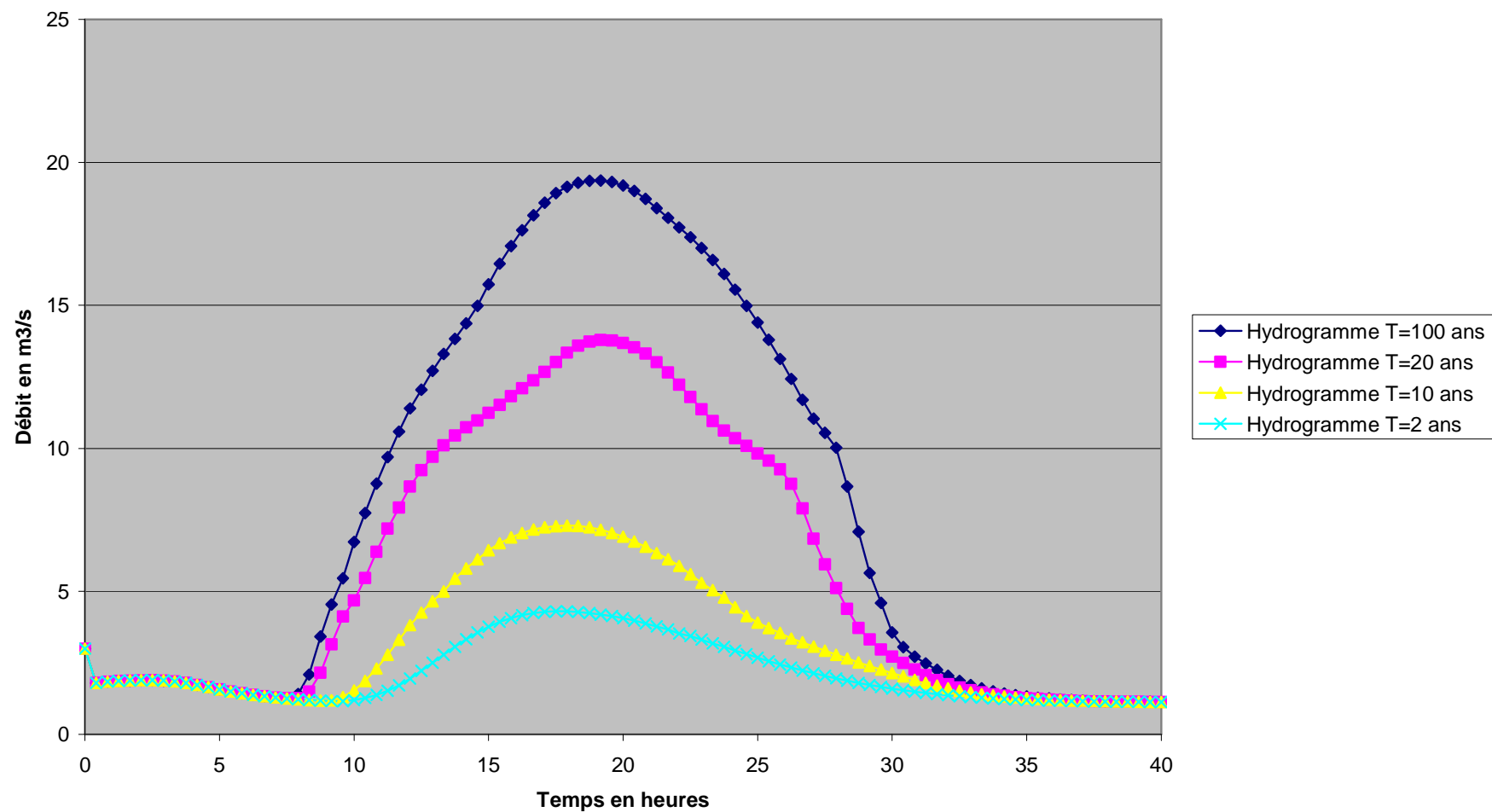
On constate qu'en aval du modèle, le débit de pointe obtenu suite à une précipitation de période de retour décennale sur l'ensemble du bassin versant engendre un débit en aval comparable au pic atteint lors de la crue de 2001, considérée comme une crue d'occurrence vicennale. Cela illustre bien le fait qu'une pluie d'une occurrence donnée tombant en tout point du bassin versant engendre une crue d'une occurrence supérieure à la pluie.

En comparant les lignes d'eau obtenues pour les différentes occurrences de pluviométrie à la ligne d'eau de la crue de 2001, on constate une certaine variabilité de la période de retour à attribuer à la crue de 2001 selon les affluents considérés : par exemple, la crue de 2001 est inférieure à la crue obtenue à partir d'une pluviométrie décennale sur l'Yser à Esquelbecq, tandis qu'elle est comparable à une crue obtenue à partir d'une pluie vicennale sur la Peene Becque à Wormhout. Cela est dû à la différence entre la chronologie d'une pluie réelle, telle que la pluie de 2001, avec une pluie dite de Montana. En effet, en septembre 2001 la pluie est tombée de façon continue, avec plusieurs pics de pluviométries. Ainsi, le premier pic d'une pluie engendre un hydrogramme à l'exutoire d'un bassin versant amont. Cet hydrogramme se propage vers l'aval et son pic peut arriver au niveau de l'exutoire d'un bassin versant aval lorsque celui-ci restitue le pic d'un hydrogramme engendré par un second pic de la pluie. On a alors concomitance des pics des hydrogrammes, ce qui augmente les débits et les niveaux d'eau. La chronologie d'une pluie obtenue à partir des coefficients de Montana est totalement différente et beaucoup plus simple : elle débute, son intensité augmente pour arriver à un maximum puis elle diminue pour s'arrêter. Elle n'a qu'un seul pic, qui s'applique à tous les bassins versants au même moment, et le type de concomitance décrit précédemment qui survient lors de pluies réelles ne peut exister dans ce cas.

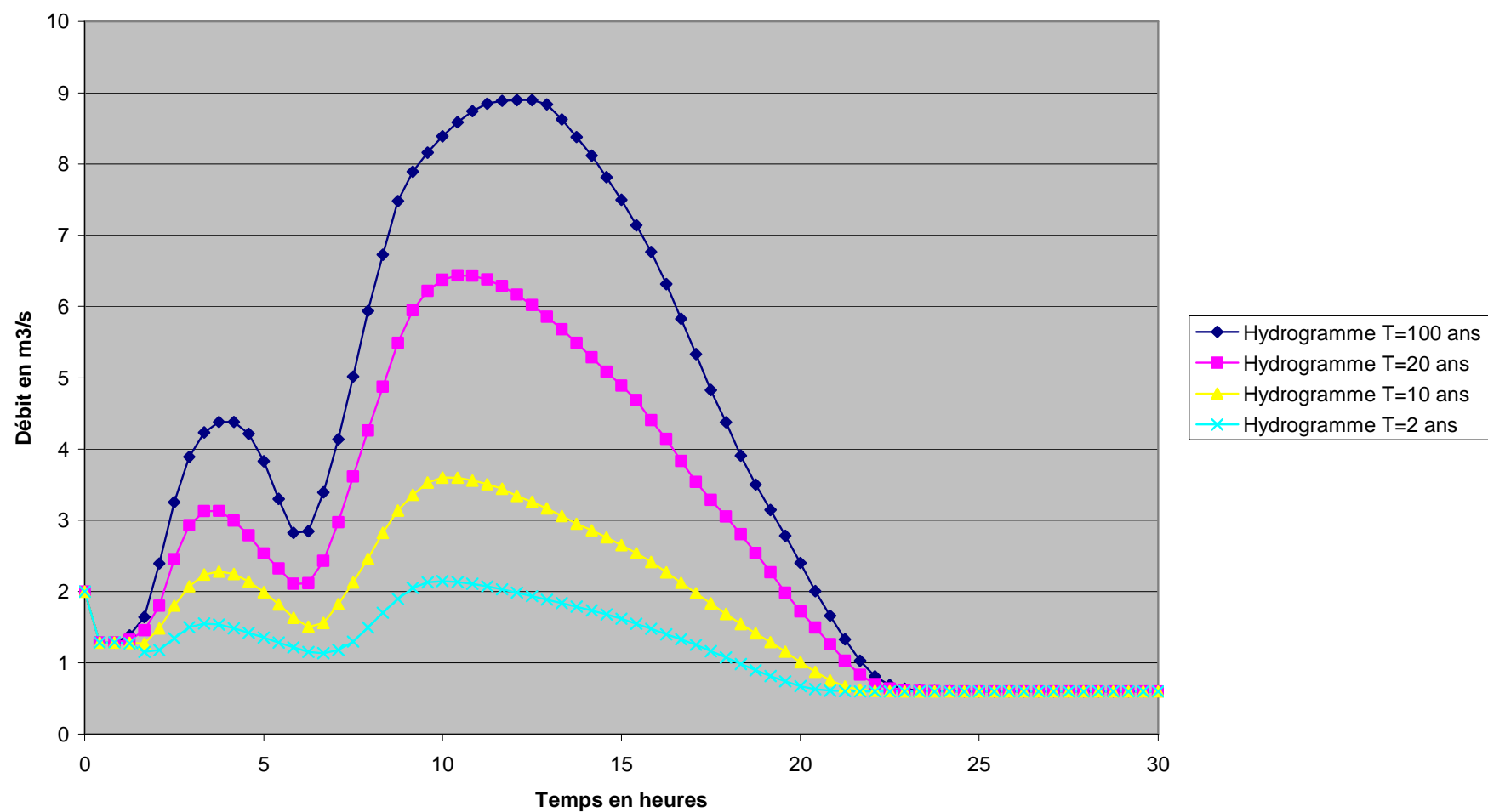
3.2.1.2. EVENEMENTS ESTIVAUX

Les hydrogrammes obtenus pour chaque période de retour au niveau des stations de Steenvoorde et d'Ochtezeele (zones touchées par l'orage), ainsi que les profils en long sur chaque affluent et pour chaque période de retour, sont présentés dans les pages qui suivent.

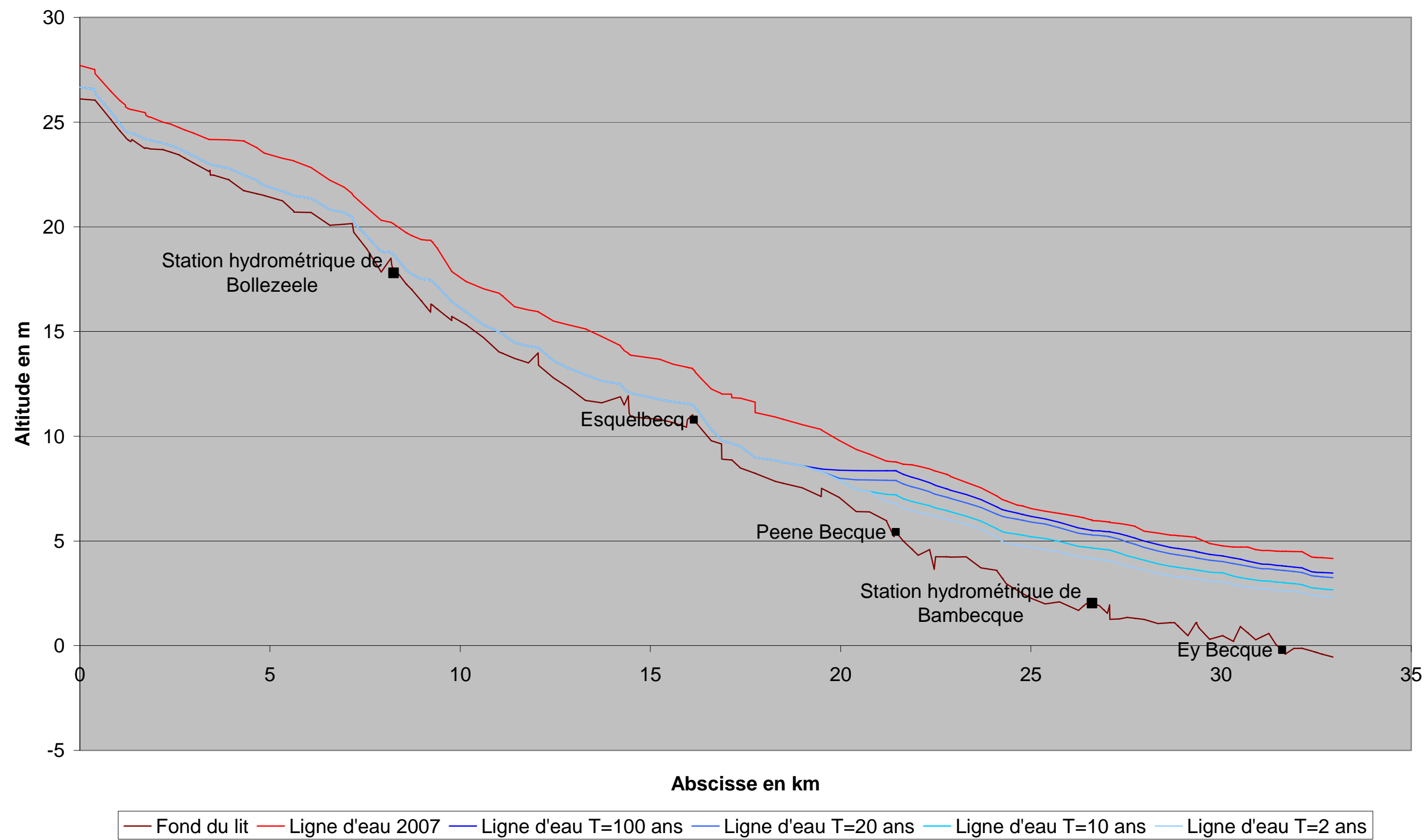
Hydrogrammes à la station de Ochteezele - événements estivaux



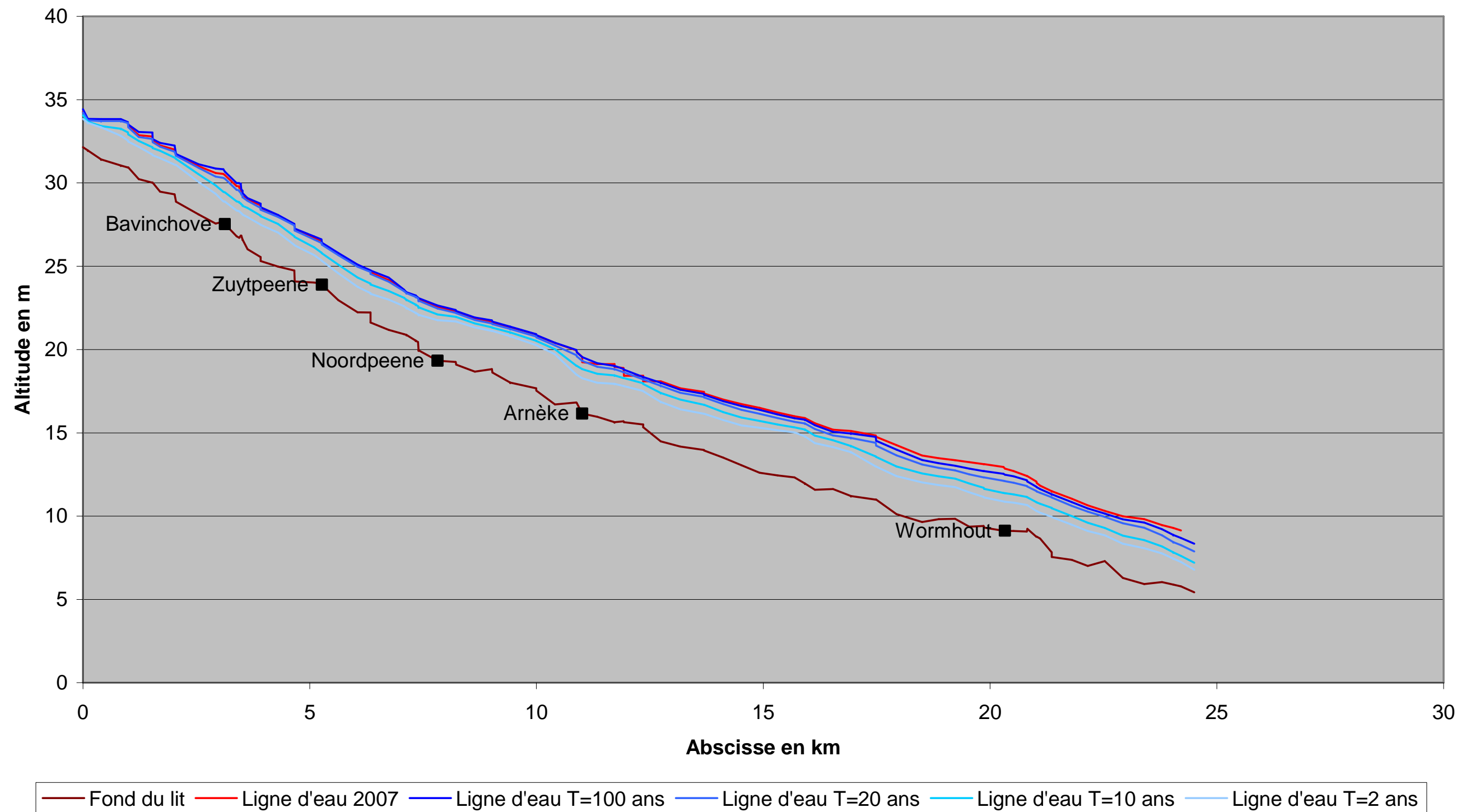
Hydrogrammes à la station de Steenvoorde - événements estivaux



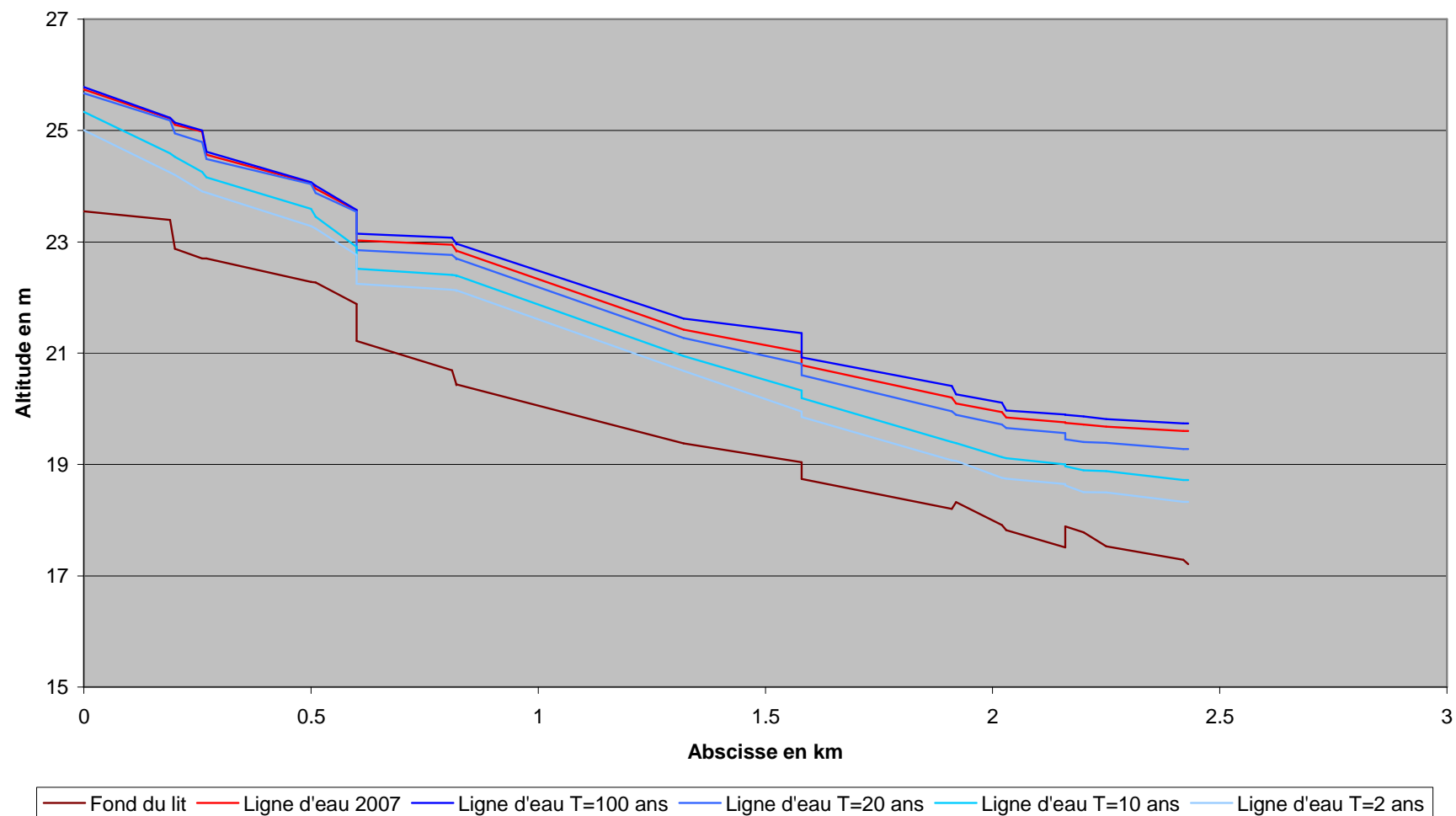
Profil en long de l'Yser



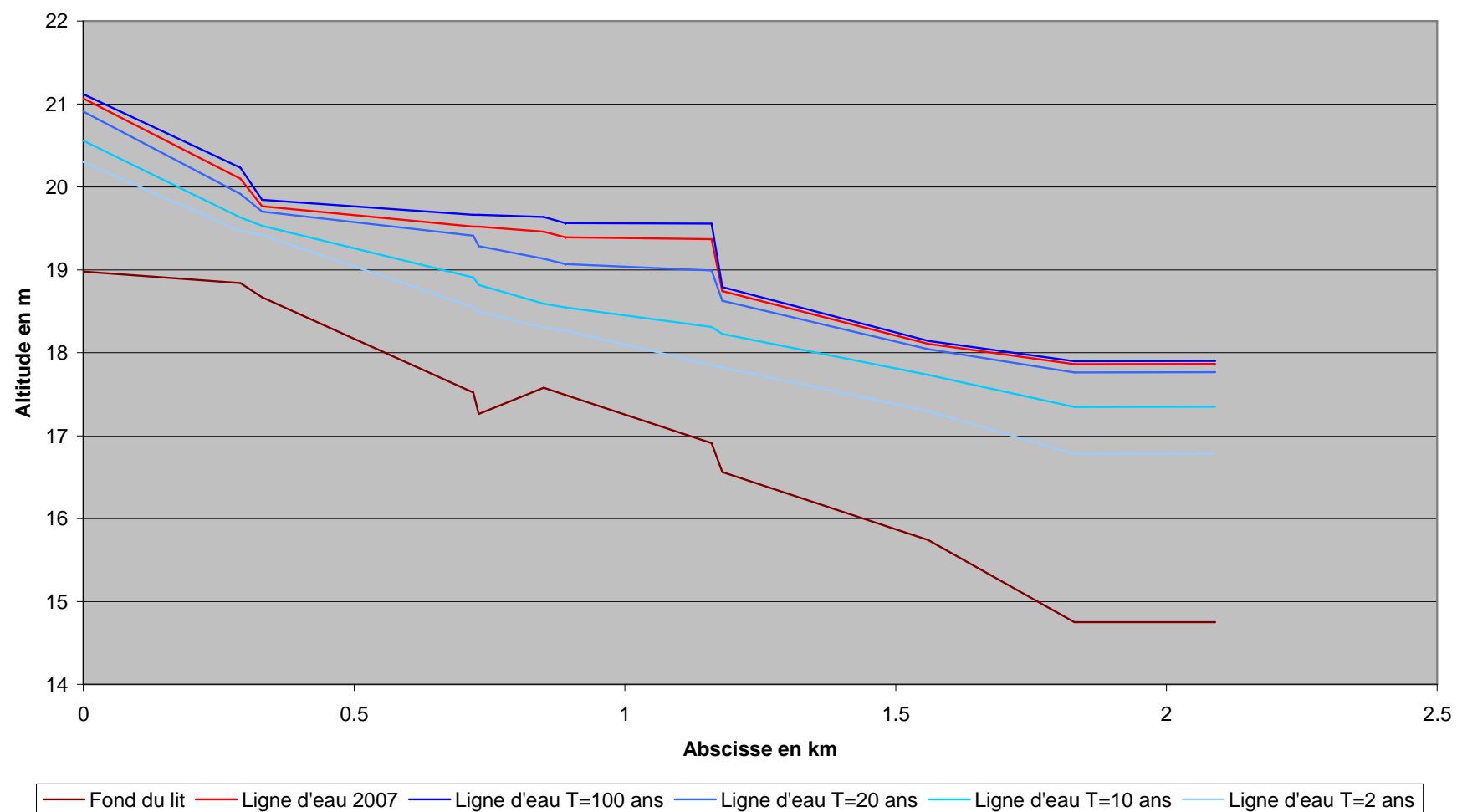
Profil en long de la Peene Becque



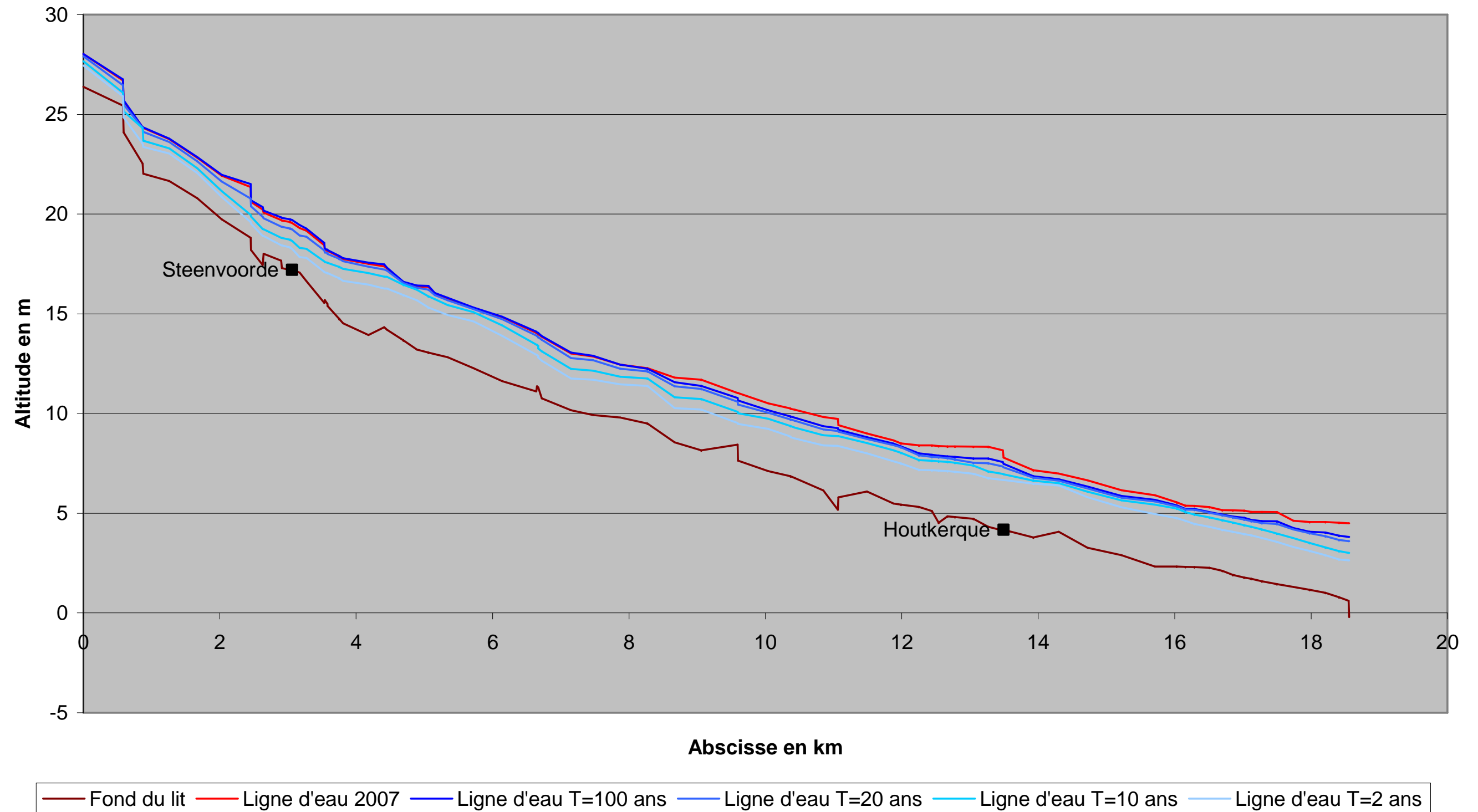
Profil en long de la Moe Becque



Profil en long de la Rommel Becque



Profil en long de l'Ey Becque



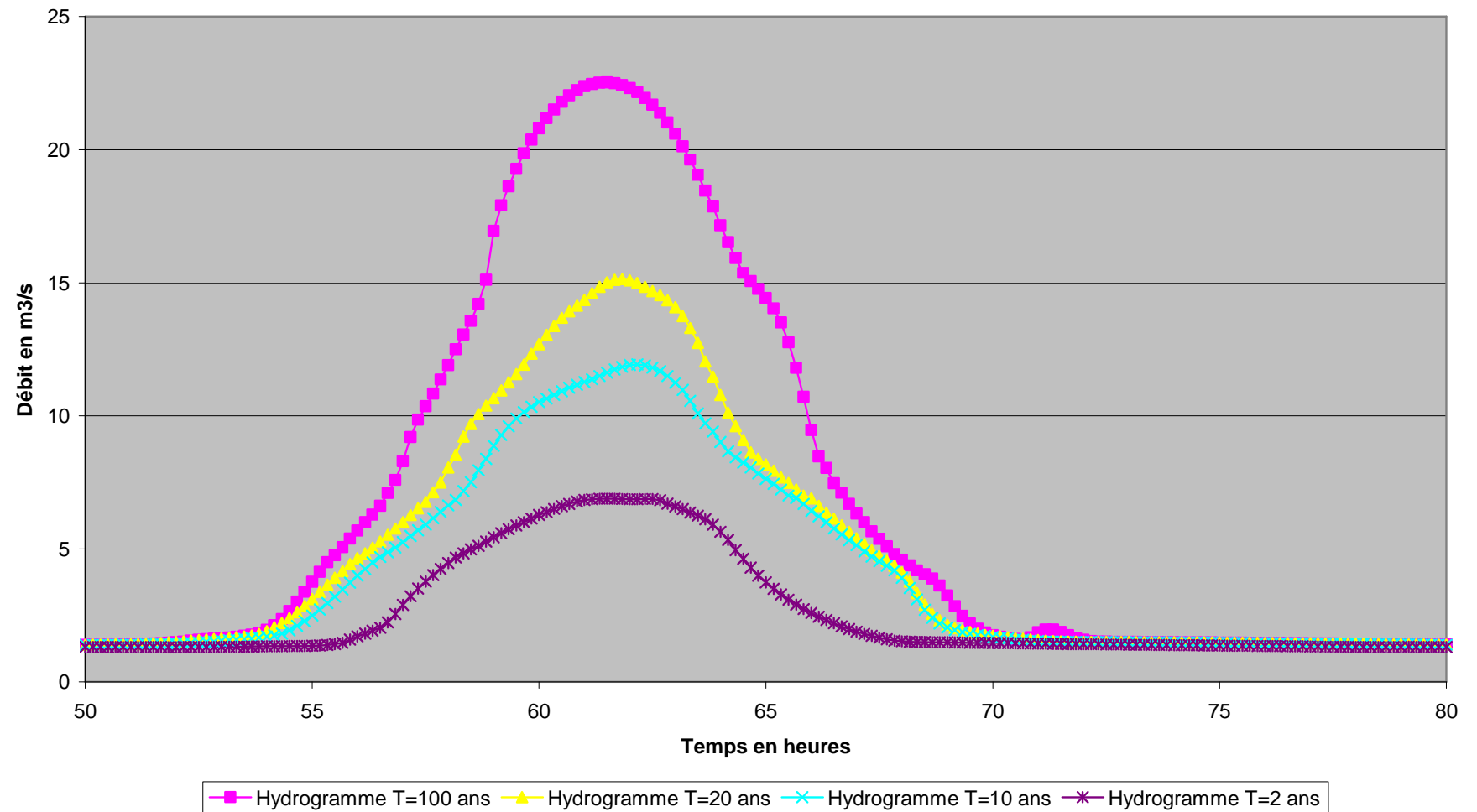
Dans les zones en amont des bassins versants de l'Ey Becque et de la Peene Becque, où l'orage simulé sévit, on constate que l'événement centennal engendre une crue supérieure à la crue de 2007. Cette dernière reste supérieure à une crue vicennale.

3.2.2. BASSIN VERSANT DE LA VLETER BECQUE

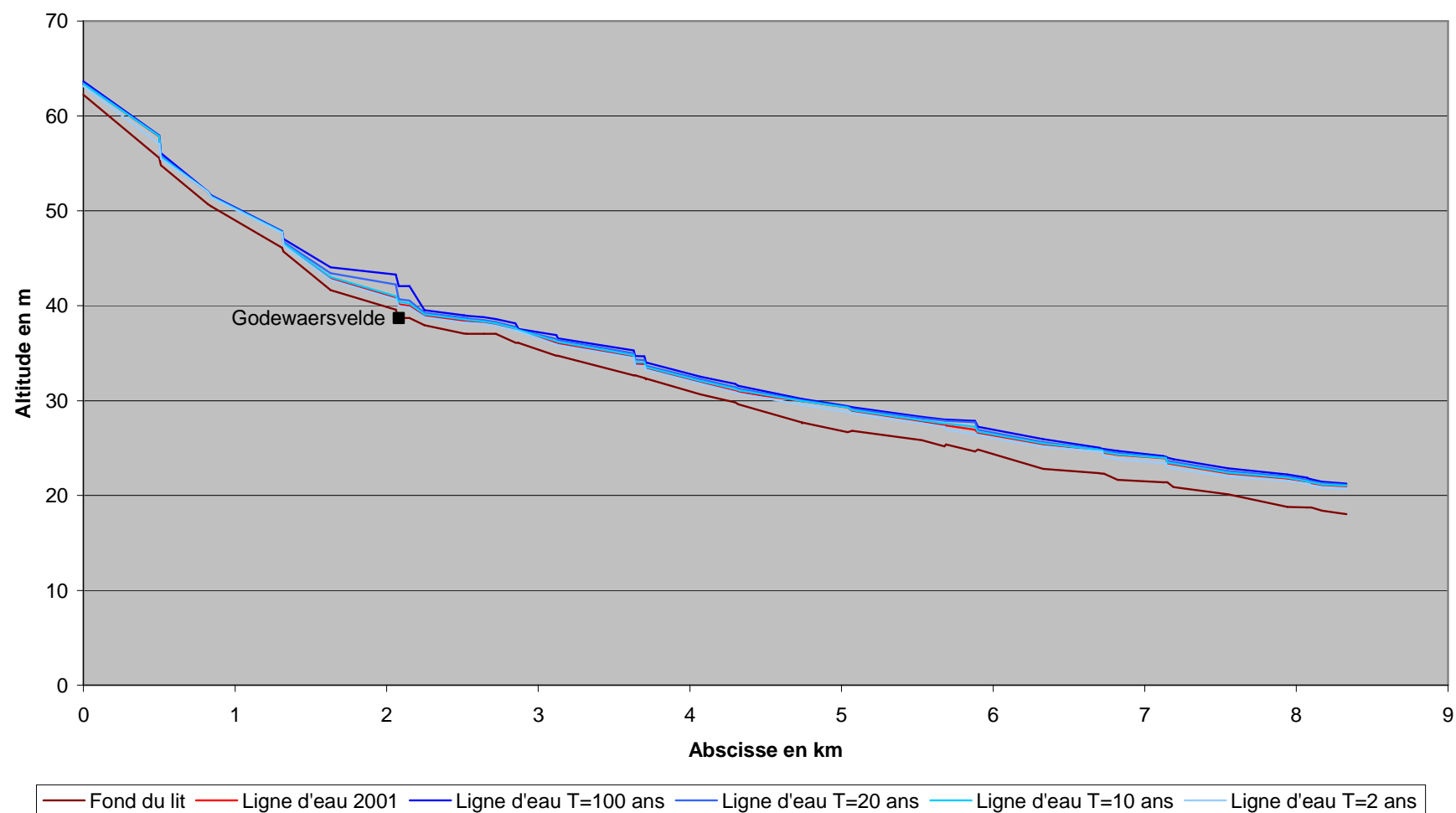
3.2.2.1. EVENEMENTS HIVERNAUX

Les hydrogrammes obtenus pour chaque période de retour au niveau de la confluence entre la Vleterbeek et la Winterbeek (aval du modèle), ainsi que le profil en long de la Vleter Becque pour chaque période de retour, sont présentés dans les pages qui suivent.

Hydrgramme modélisé à la confluence entre la Vleterbeek et la Wintebeek - événements hivernaux



Profil en long de la Vleter Becque - événements hivernaux

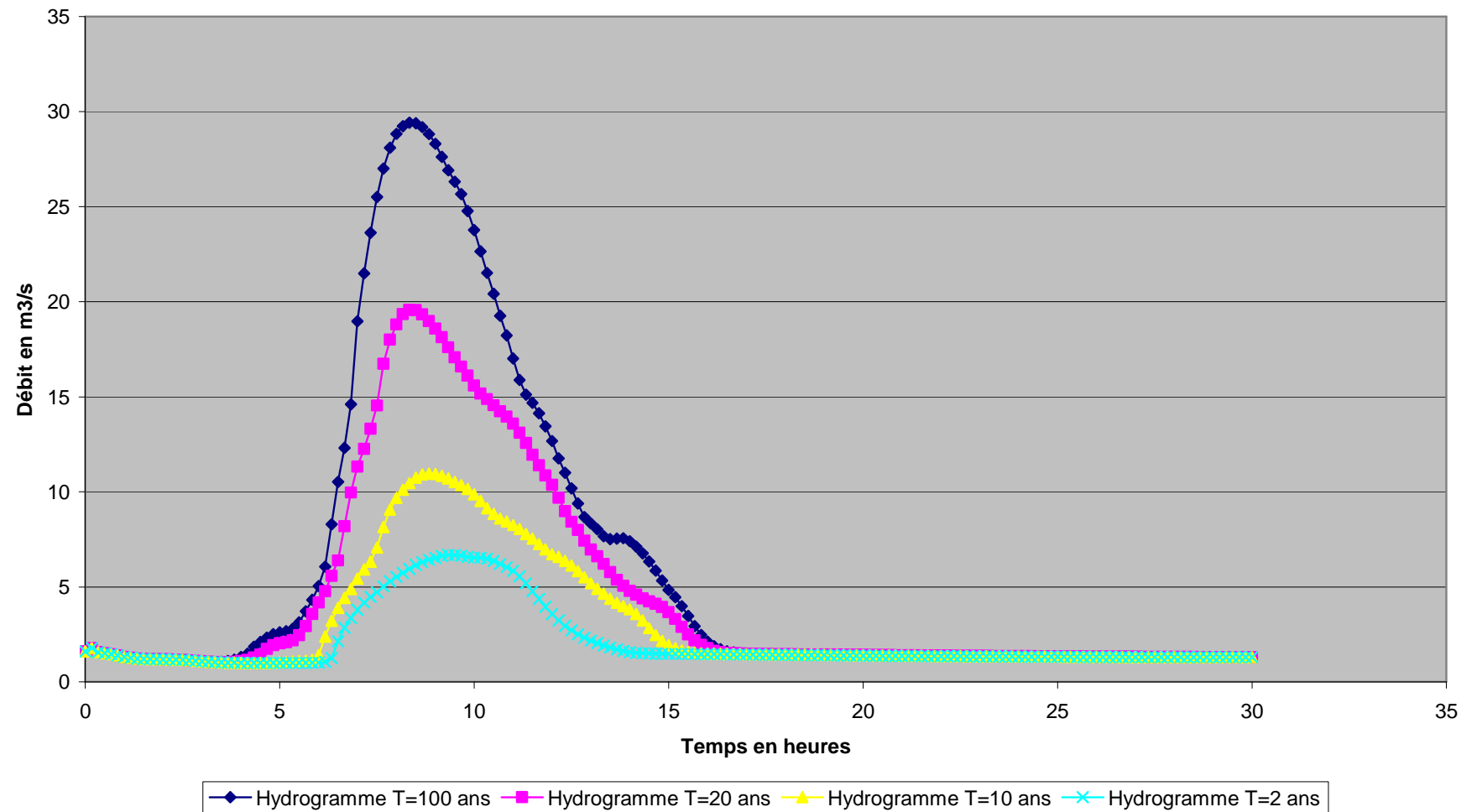


En analysant les hydrogrammes et les lignes d'eau, on constate que la crue de 2001 (qui n'a pu être véritablement calée) est proche d'une occurrence décennale.

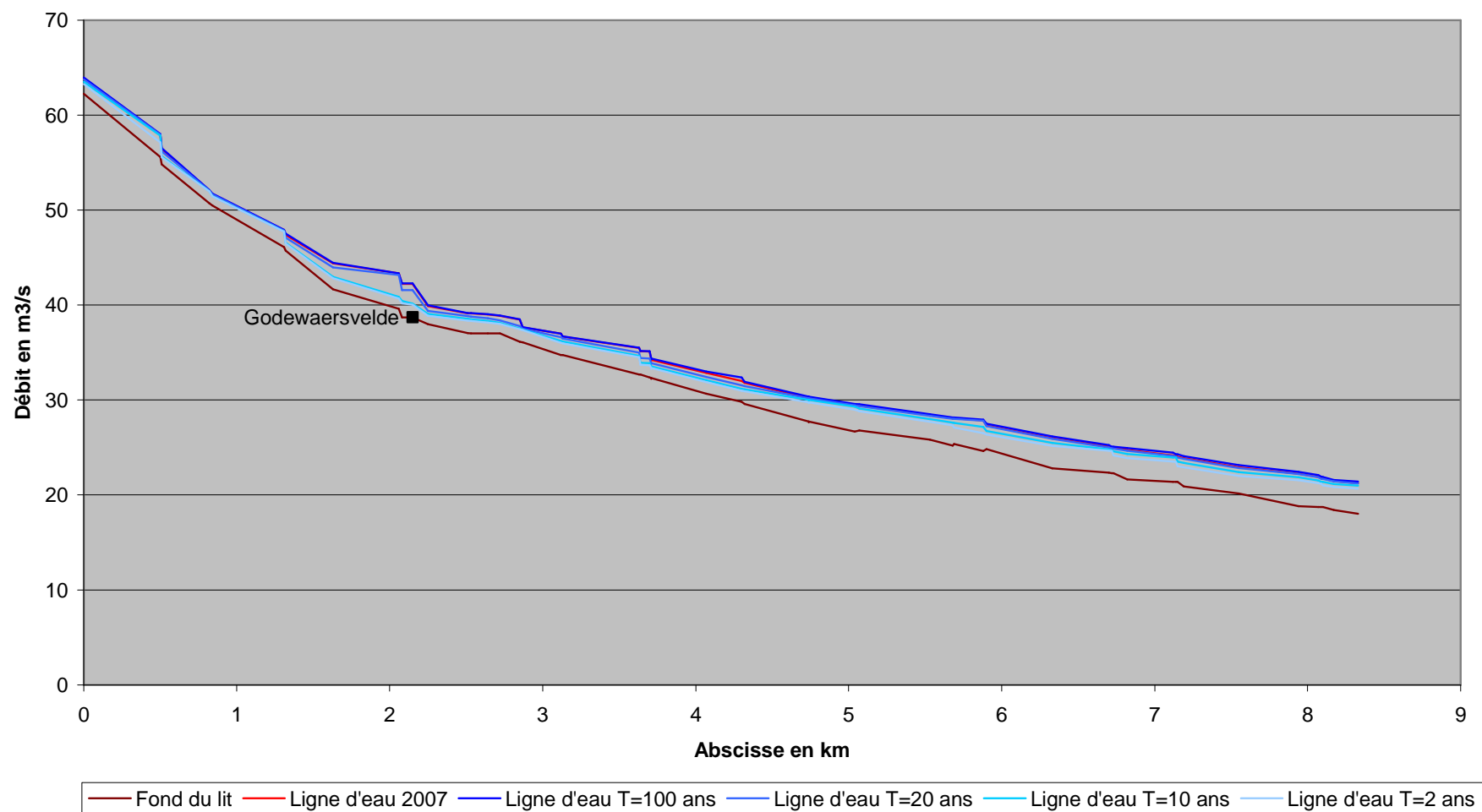
3.2.2.2. EVENEMENTS ESTIVAUX

Les hydrogrammes obtenus pour chaque période de retour au niveau de la confluence entre la Vleterbeek et la Winterbeek (aval du modèle), ainsi que le profil en long de la Vleter Becque pour chaque période de retour, sont présentés dans les pages qui suivent.

Hydrogrammes à la confluence entre la Vleterbeek et la Winterbeek - événements estivaux



Profil en long de la Vleter Becque - événements estivaux



On constate que le débit restitué par une pluie d'occurrence centennale engendre une pointe légèrement plus importante que la pluie de 2007 en aval du modèle. Les cotes atteintes par la ligne d'eau de la crue engendrée par l'orage centennal sont par conséquent légèrement supérieures à celles de la crue de juillet 2007 (quelques centimètres à trois décimètres).

oOo

4. CARTOGRAPHIE DES CRUES DE REFERENCE

Les crues de calage (2001 et 2007) ainsi que les événements simulés ont été cartographiées à partir des résultats obtenus par la modélisation numérique.

Cette cartographie a été réalisée à partir des profils en travers levés et d'une interpolation entre ces profils en travers, effectuée au regard des courbes de niveau des fonds de plan de l'IGN.

Pour la cartographie de calage de la crue de 2001, nous avons également fait apparaître les contours de la zone d'expansion de la crue qui a été photographié par avion en 2001. ceci permet de comparer visuellement l'emprise de la crue observée et de la crue calculée puis cartographiée.

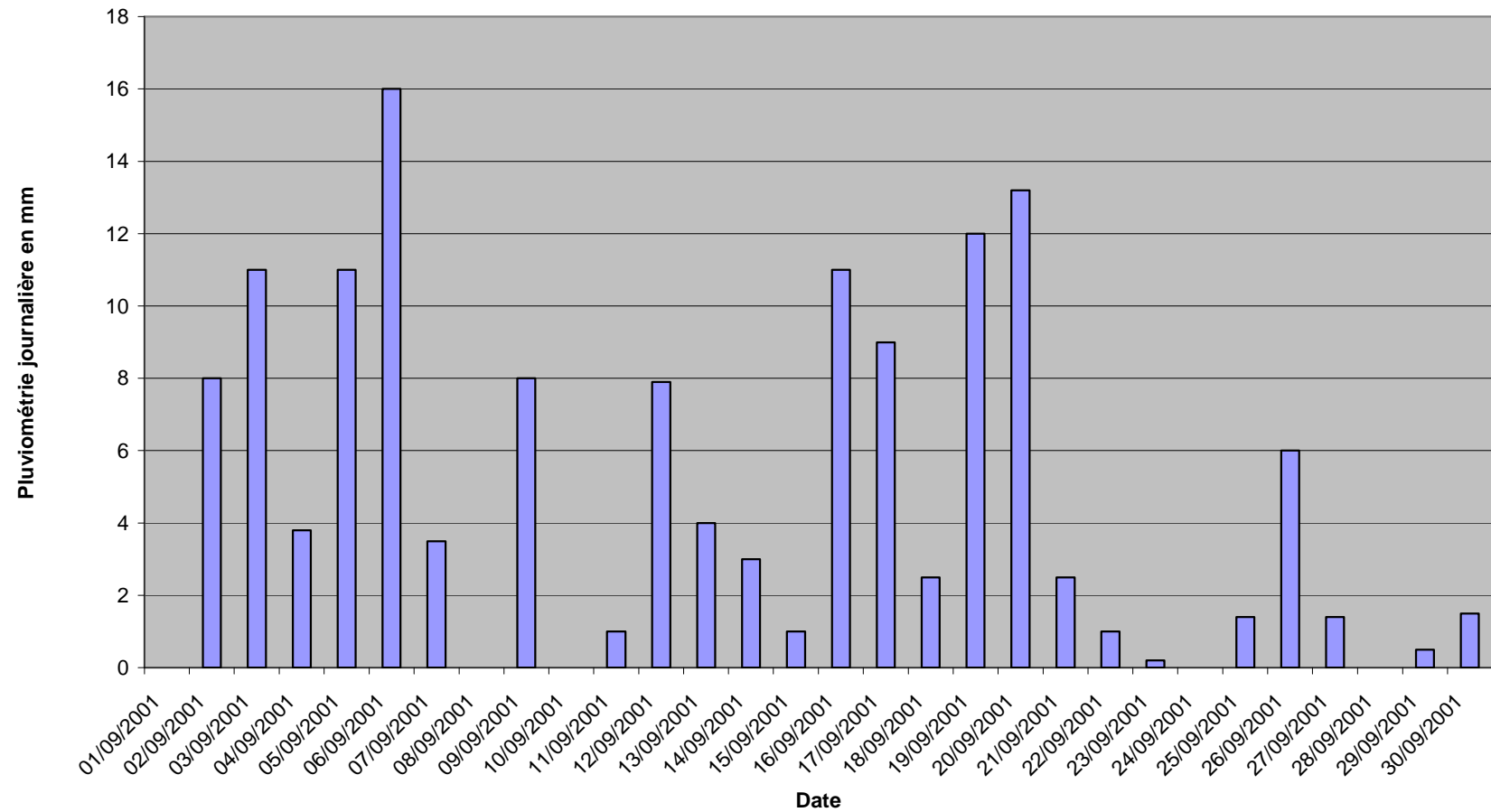
La cartographie de l'ensemble des crues a été faite à l'échelle 1/5000 sur le fond de plan de l'IGN.

Les cartes des zones inondées pour les différents événements simulés sont fournies en annexe 25.

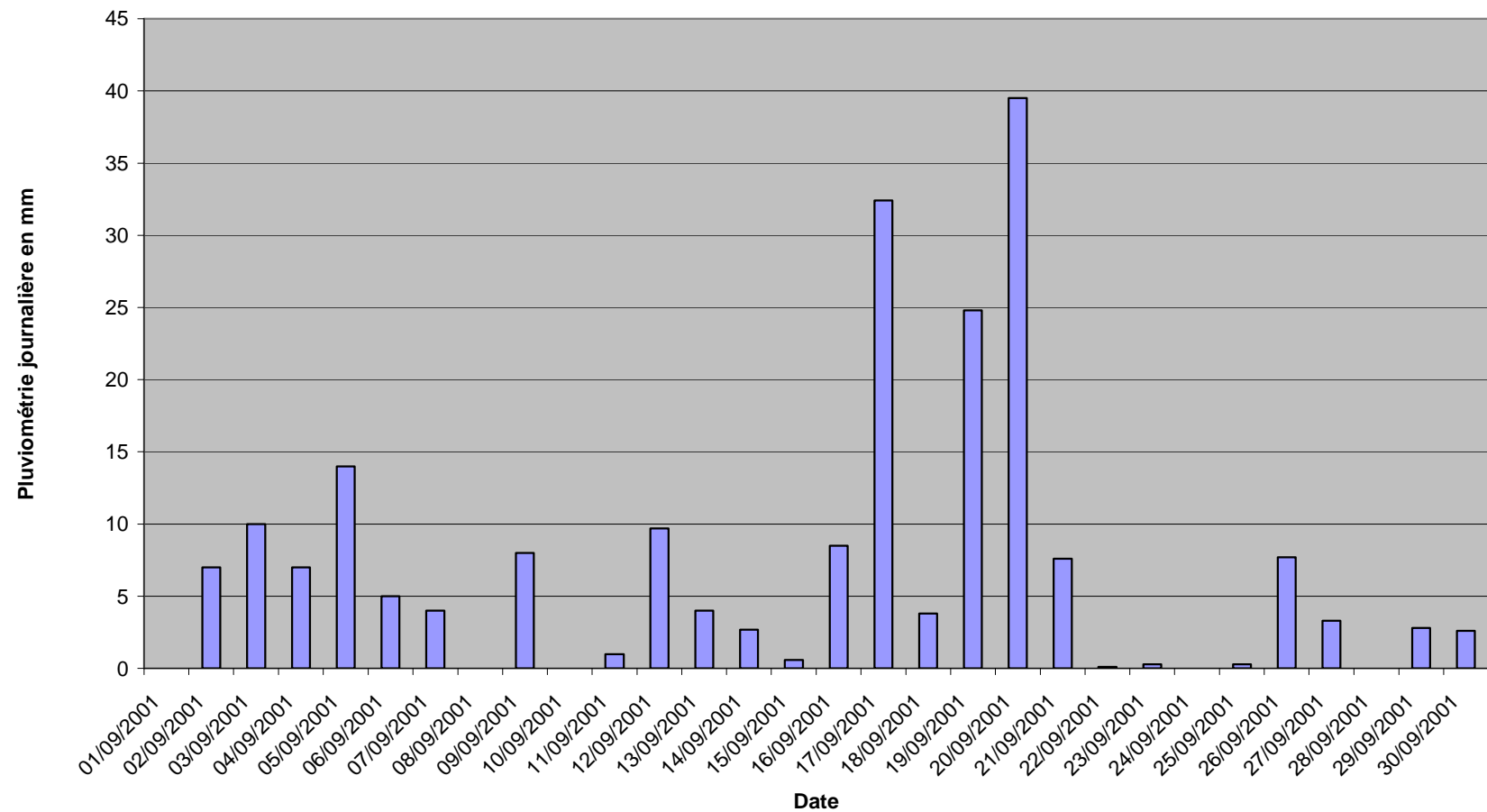
oOo

**ANNEXE 1 : PLUVIOMETRIE JOURNALIERE AUX DIFFERENTES STATIONS EN
SEPTEMBRE 2001**

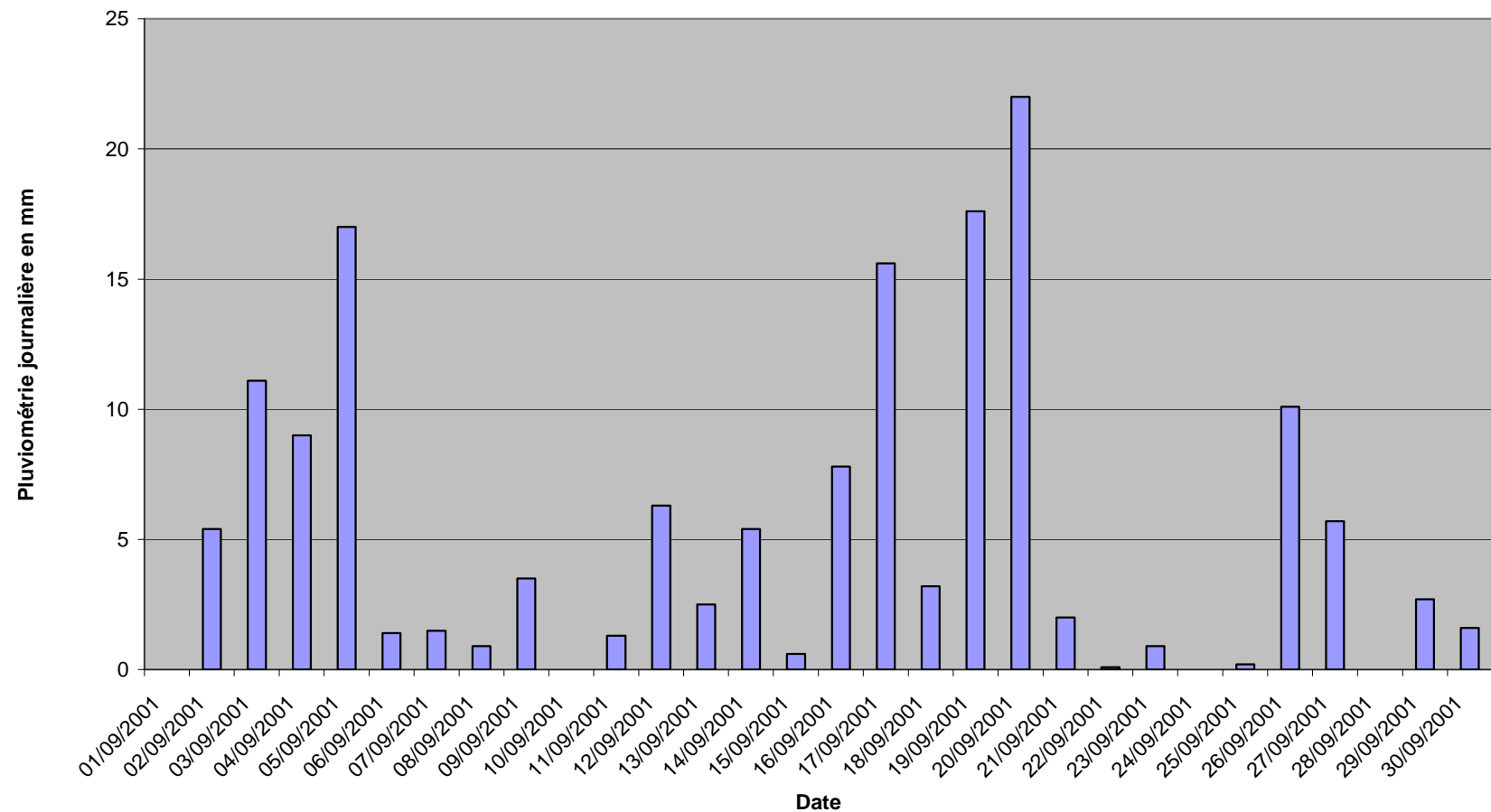
Pluviométrie journalière mesurée à Borre en septembre 2001



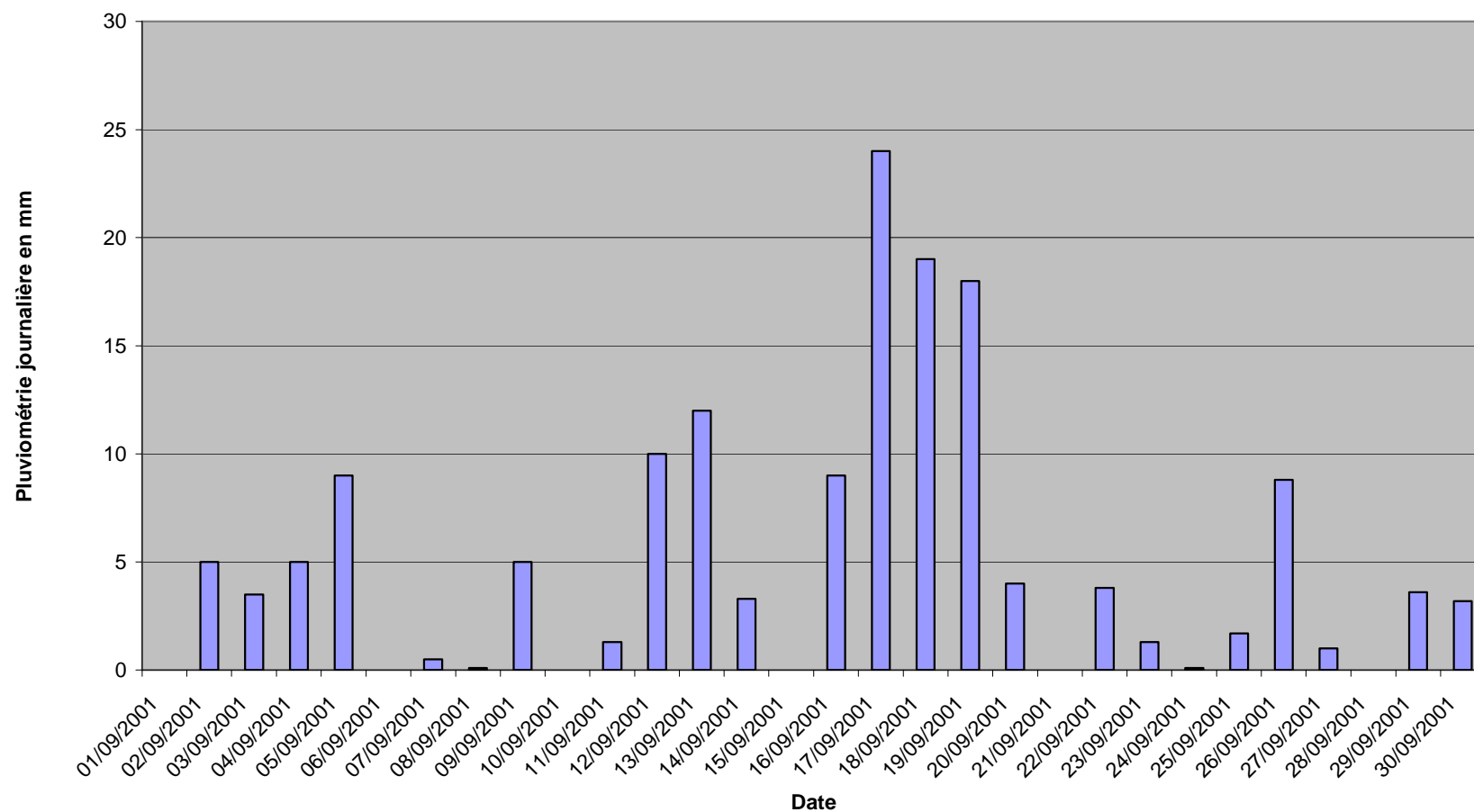
Pluviométrie journalière mesurée à Cassel en septembre 2001



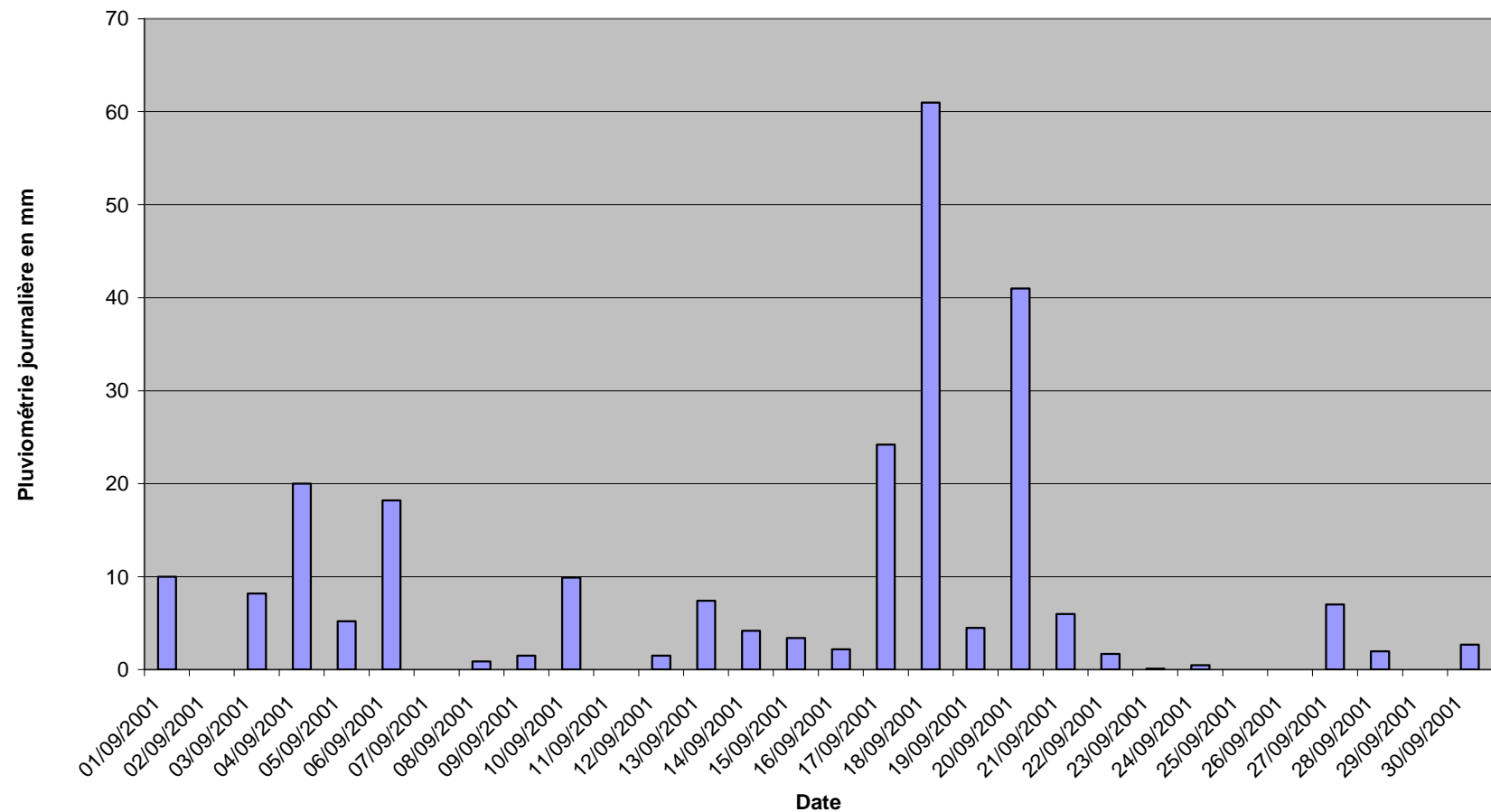
Pluviométrie journalière mesurée à Eringhem en septembre 2001



Pluviométrie journalière mesurée à Saint Omer en septembre 2001

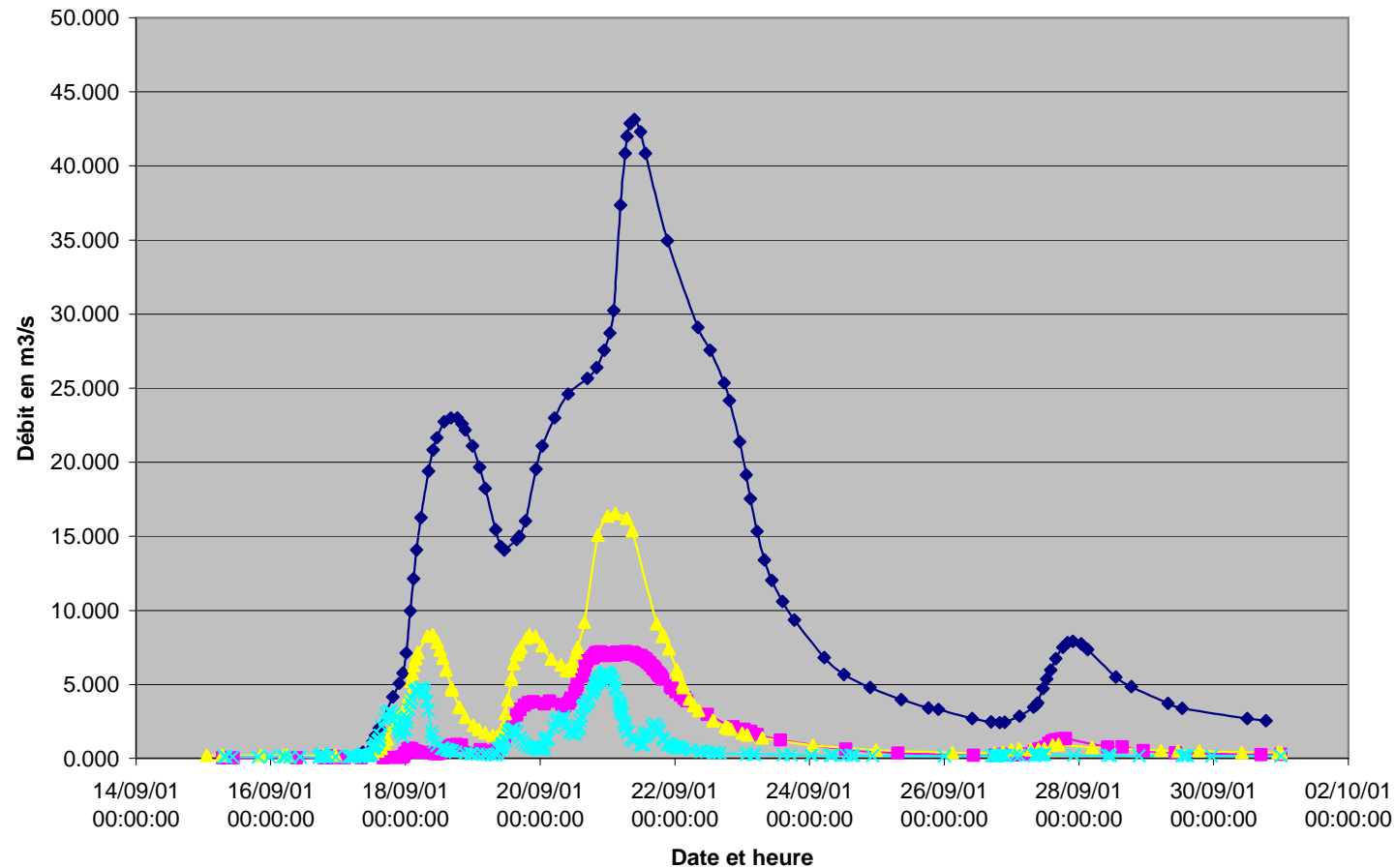


Pluviométrie journalière mesurée à Poperinge en septembre 2001



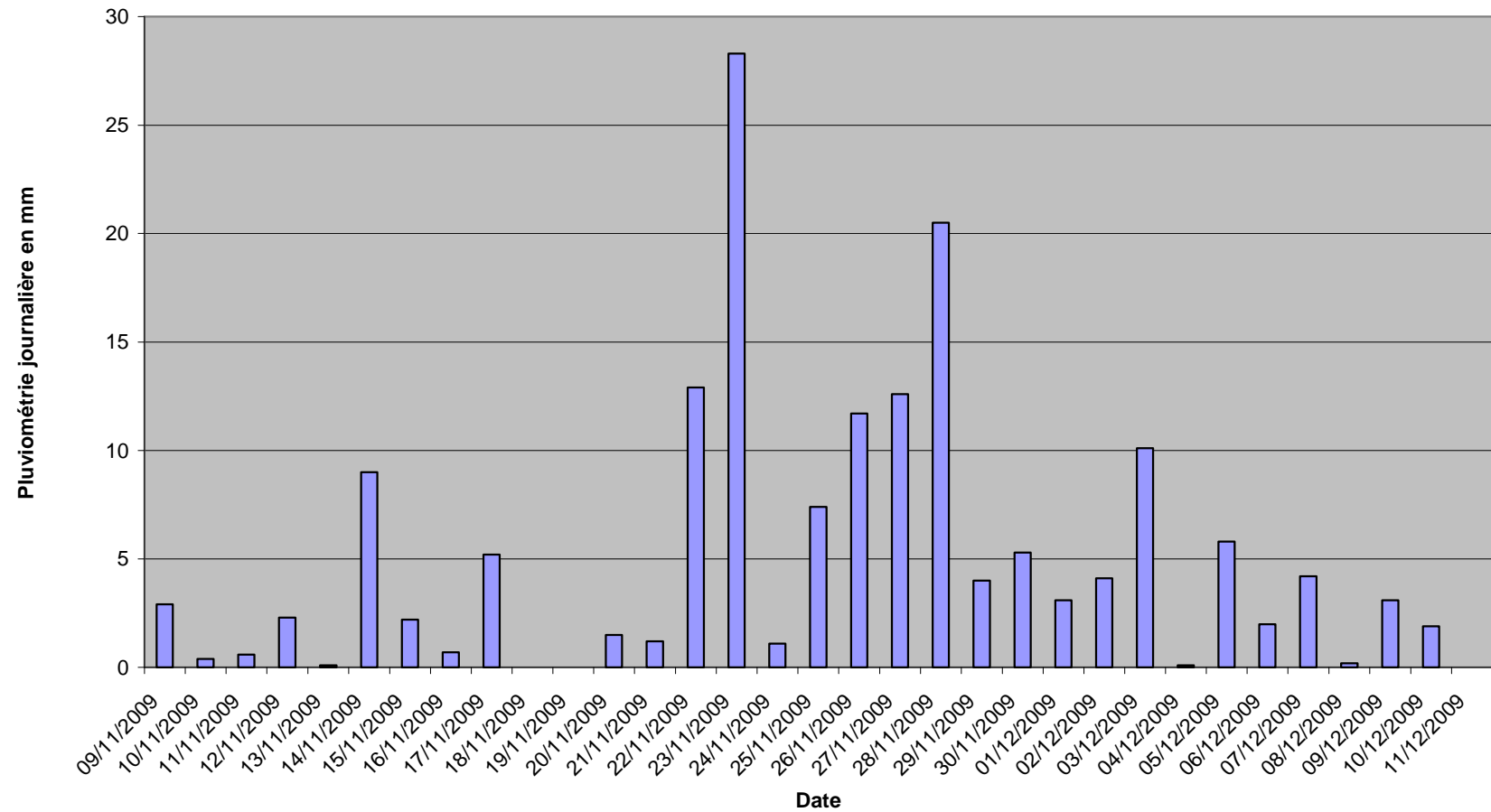
**ANNEXE 2 : HYDROGRAMMES MESURES AUX STATIONS HYDROMETRIQUES DU
BASSIN VERSANT DE L'YSER EN SEPTEMBRE 2001**

Hydrométrie mesurée sur le bassin versant de l'Yser en septembre 2001

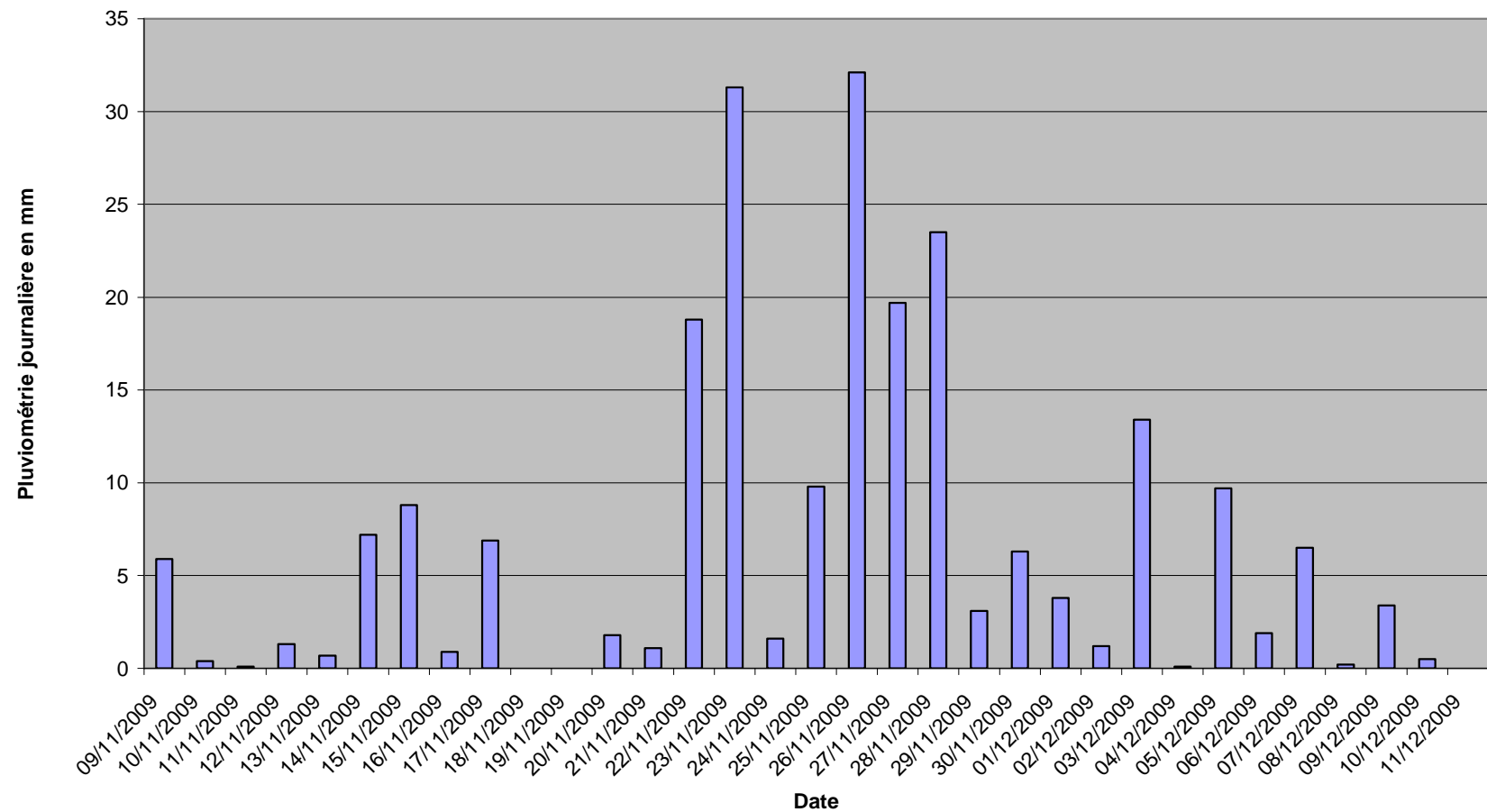


**ANNEXE 3 : PLUVIOMETRIE JOURNALIERE A BORRE ET SAINT OMER EN
NOVEMBRE-DECEMBRE 2009**

Pluviométrie journalière mesurée à Borre en novembre - décembre 2009

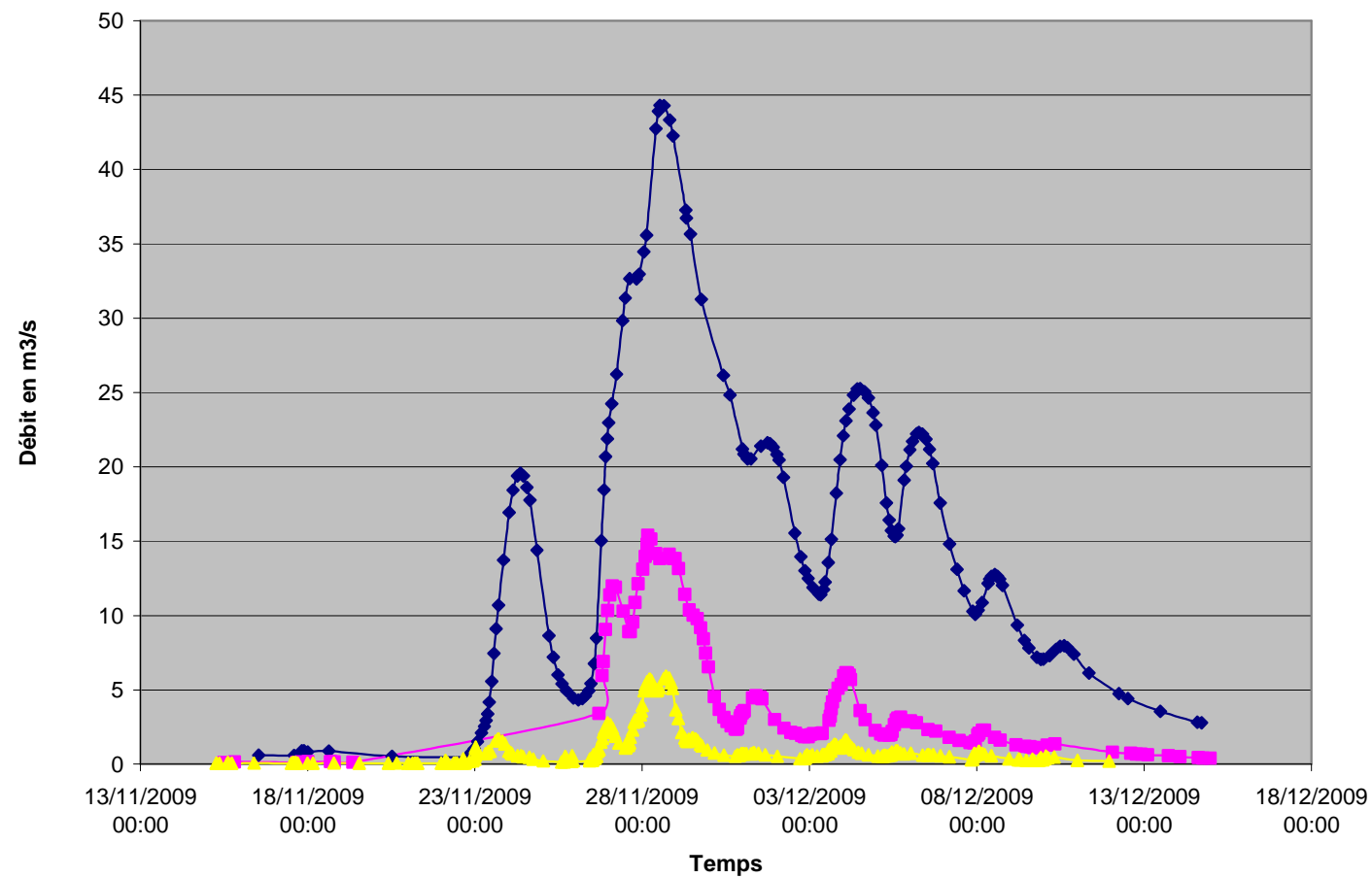


Pluviométrie journalière mesurée à Saint Omer en novembre - décembre 2009



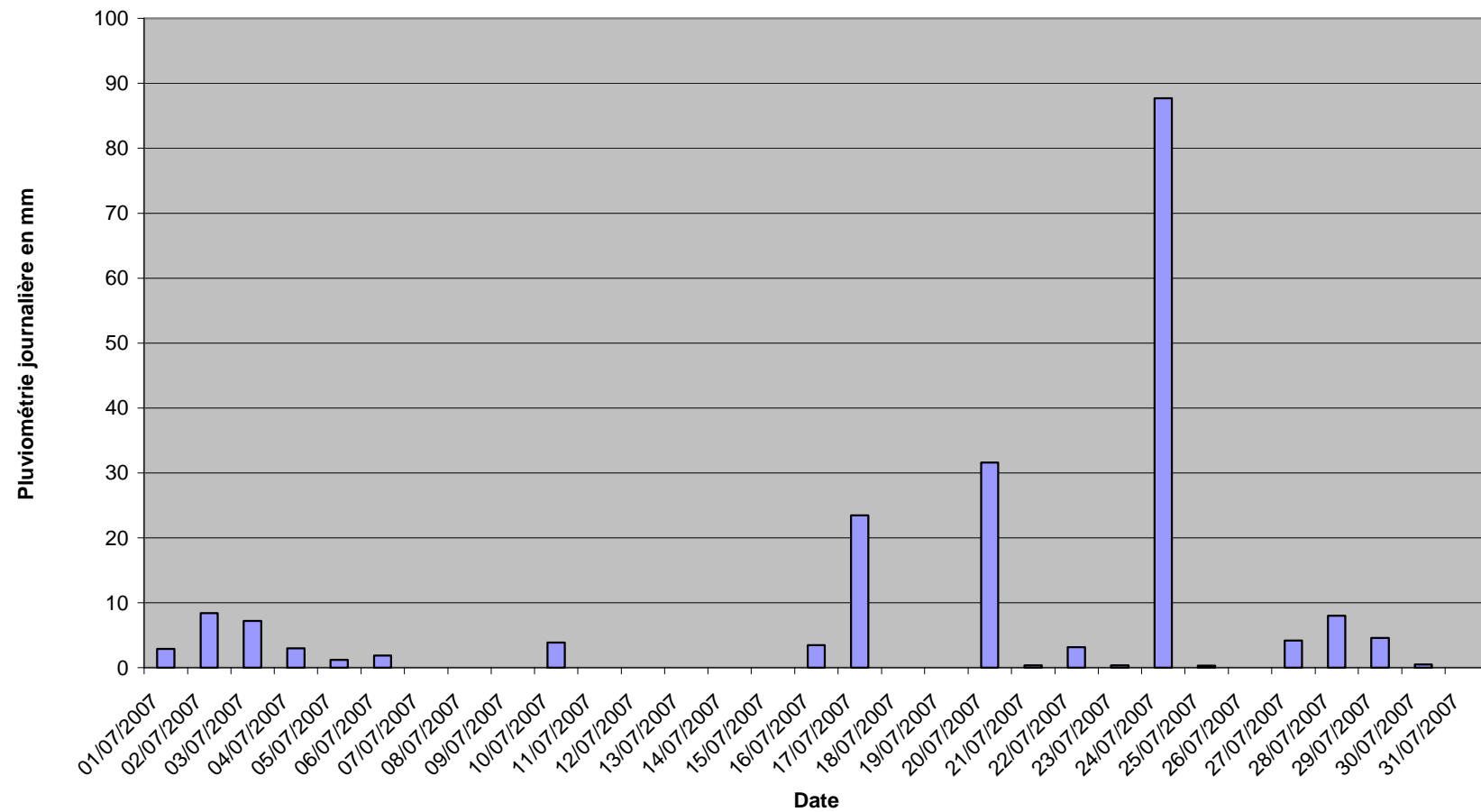
**ANNEXE 4 : HYDROGRAMMES MESURES AUX STATIONS HYDROMETRIQUES DU
BASSIN VERSANT DE L'YSER EN NOVEMBRE-DECEMBRE 2009**

Hydrométrie à Bambecque en novembre - décembre 2009

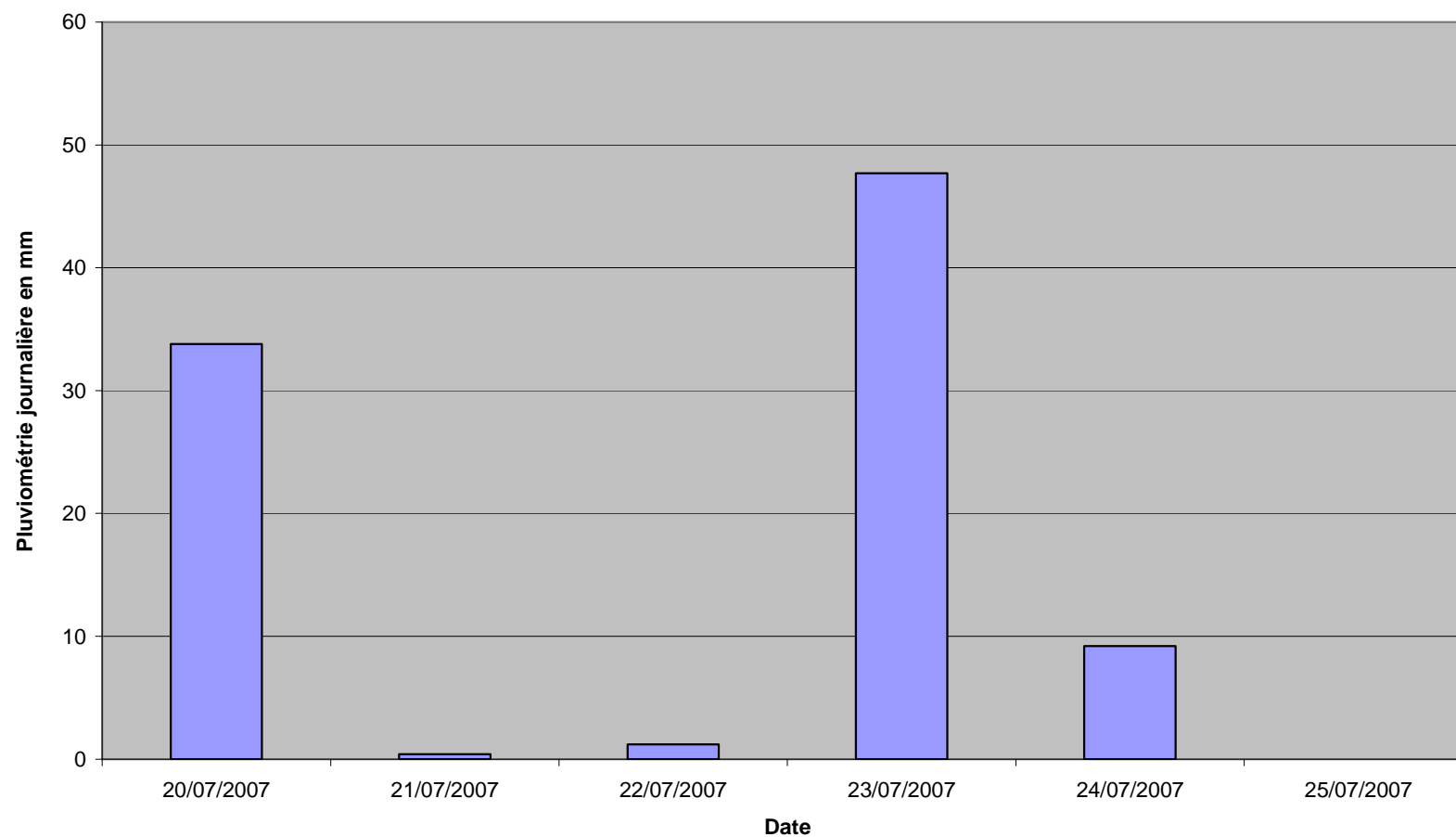


**ANNEXE 5 : PLUVIOMETRIE JOURNALIERE A BORRE, SAINT OMER,
STEENVOORDE ET POPERINGE EN JUILLET 2007**

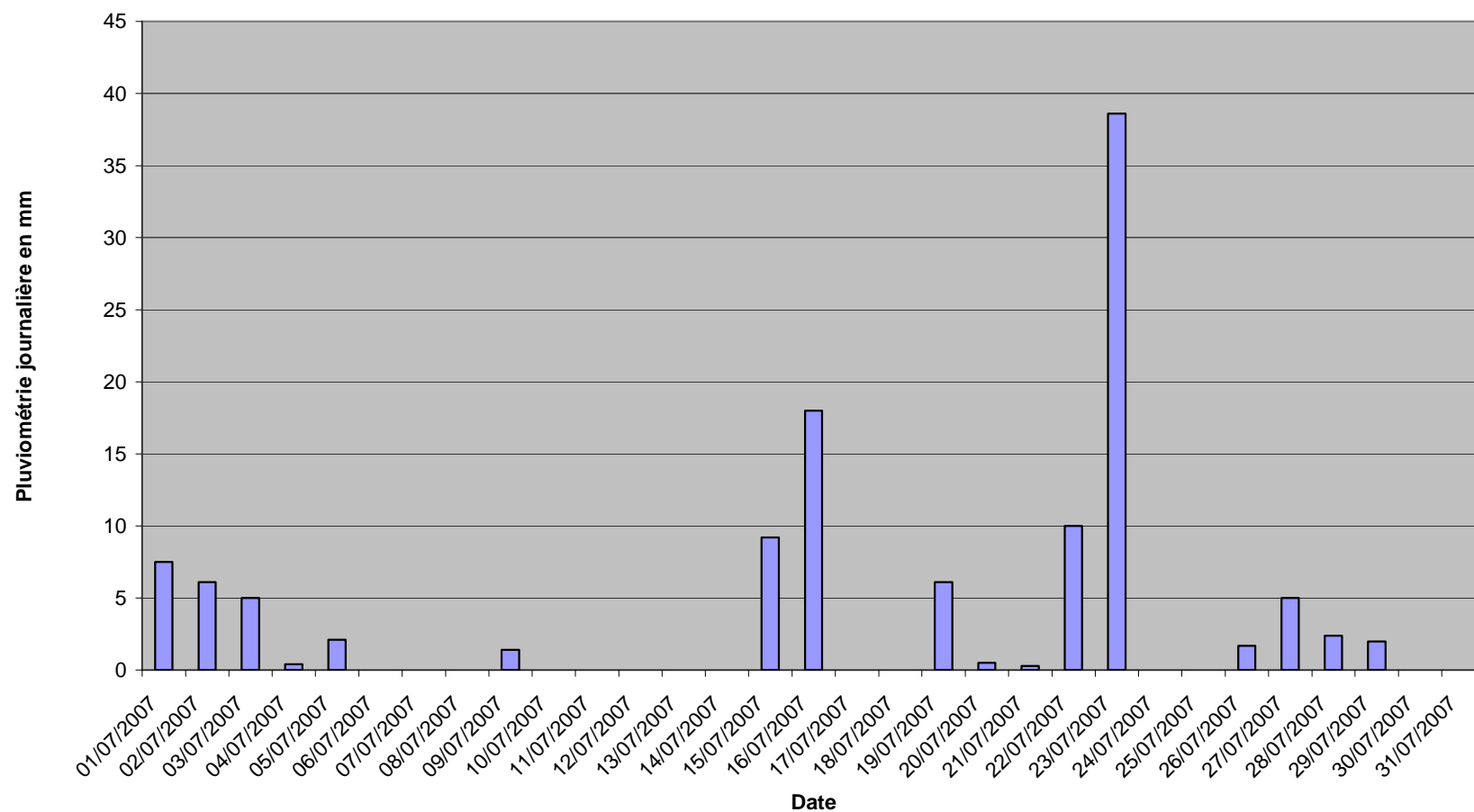
Pluviométrie journalière mesurée à Poperinge en juillet 2007



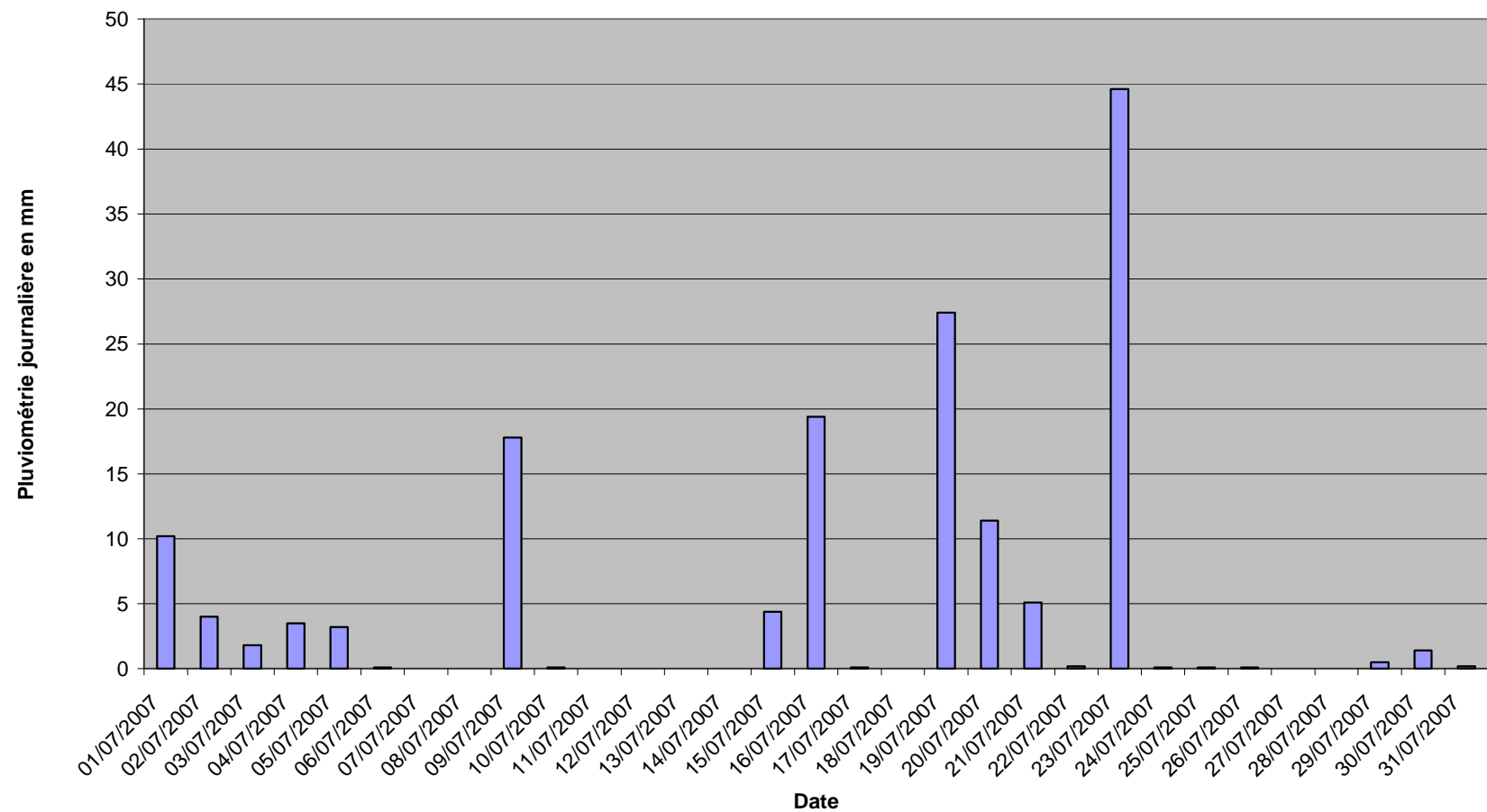
Pluviométrie journalière mesurée à Steenvoorde lors de la crue de juillet 2007



Pluviométrie journalière mesurée à Saint Omer en juillet 2007

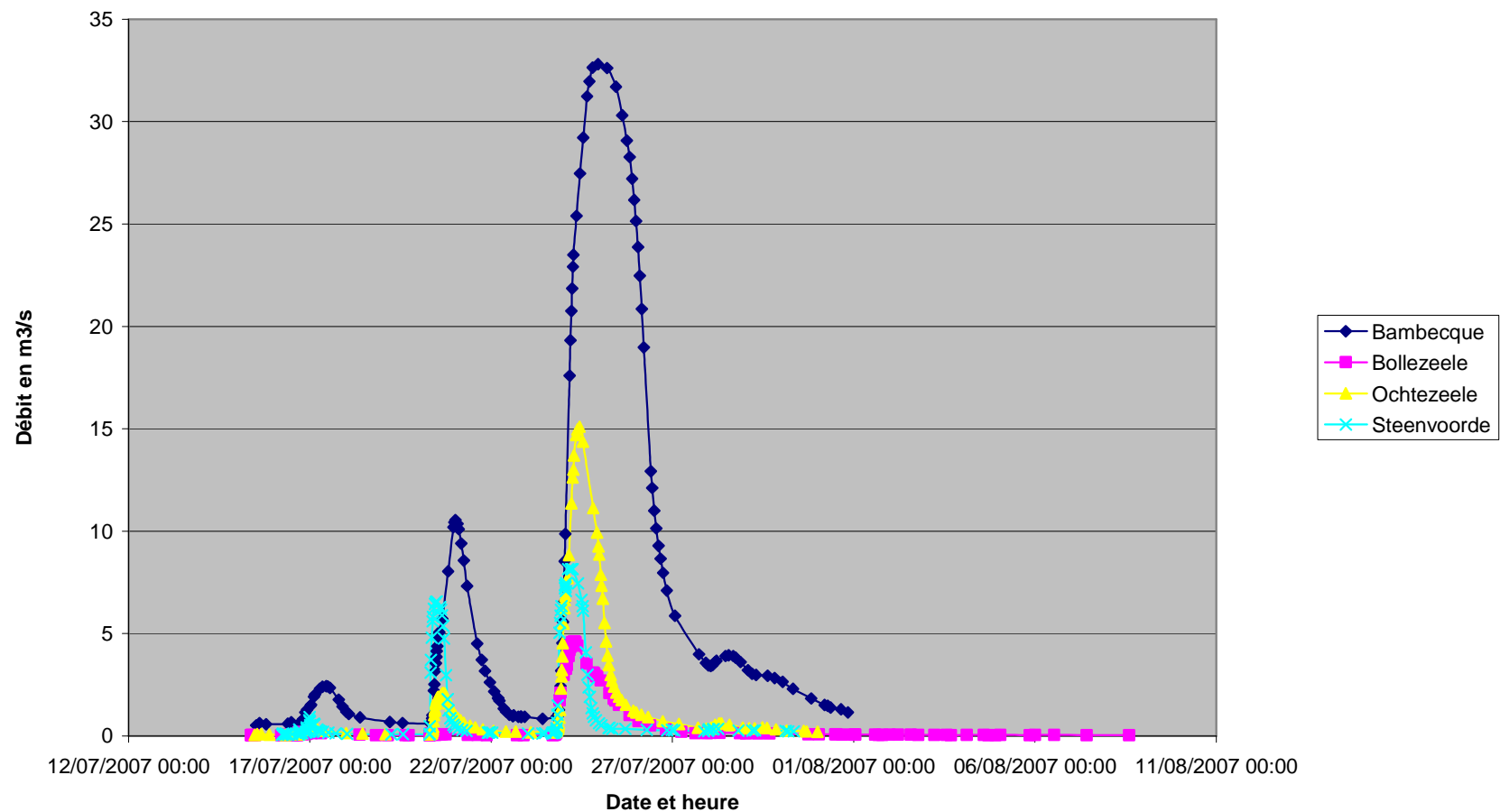


Pluviométrie journalière mesurée à Borre en septembre 2001

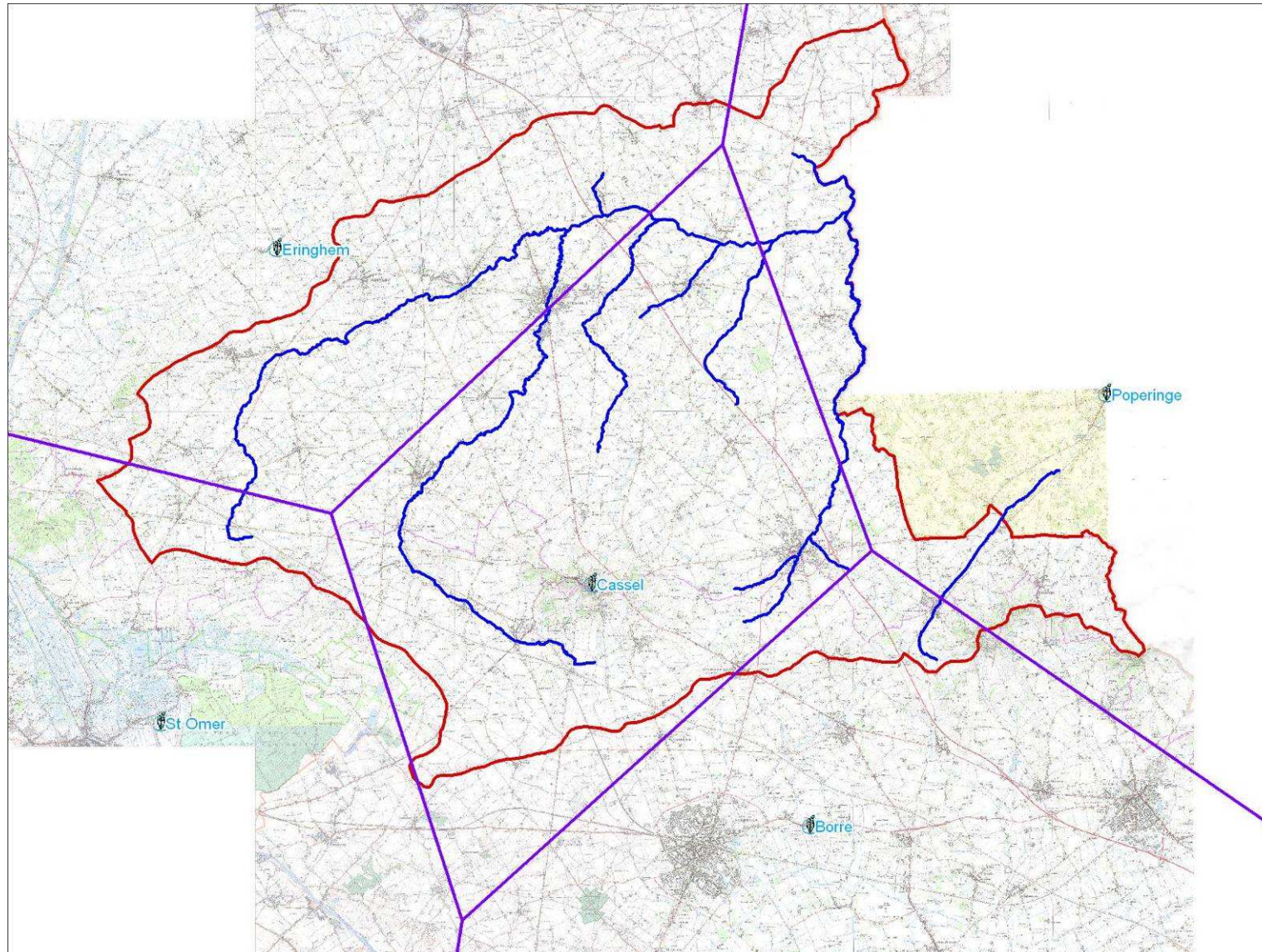


**ANNEXE 6 : HYDROGRAMMES MESURES AUX STATIONS HYDROMETRIQUES DU
BASSIN VERSANT DE L'YSER EN JUILLET 2007**

Hydrométrie mesurée sur le bassin versant de l'Yser en juillet 2007

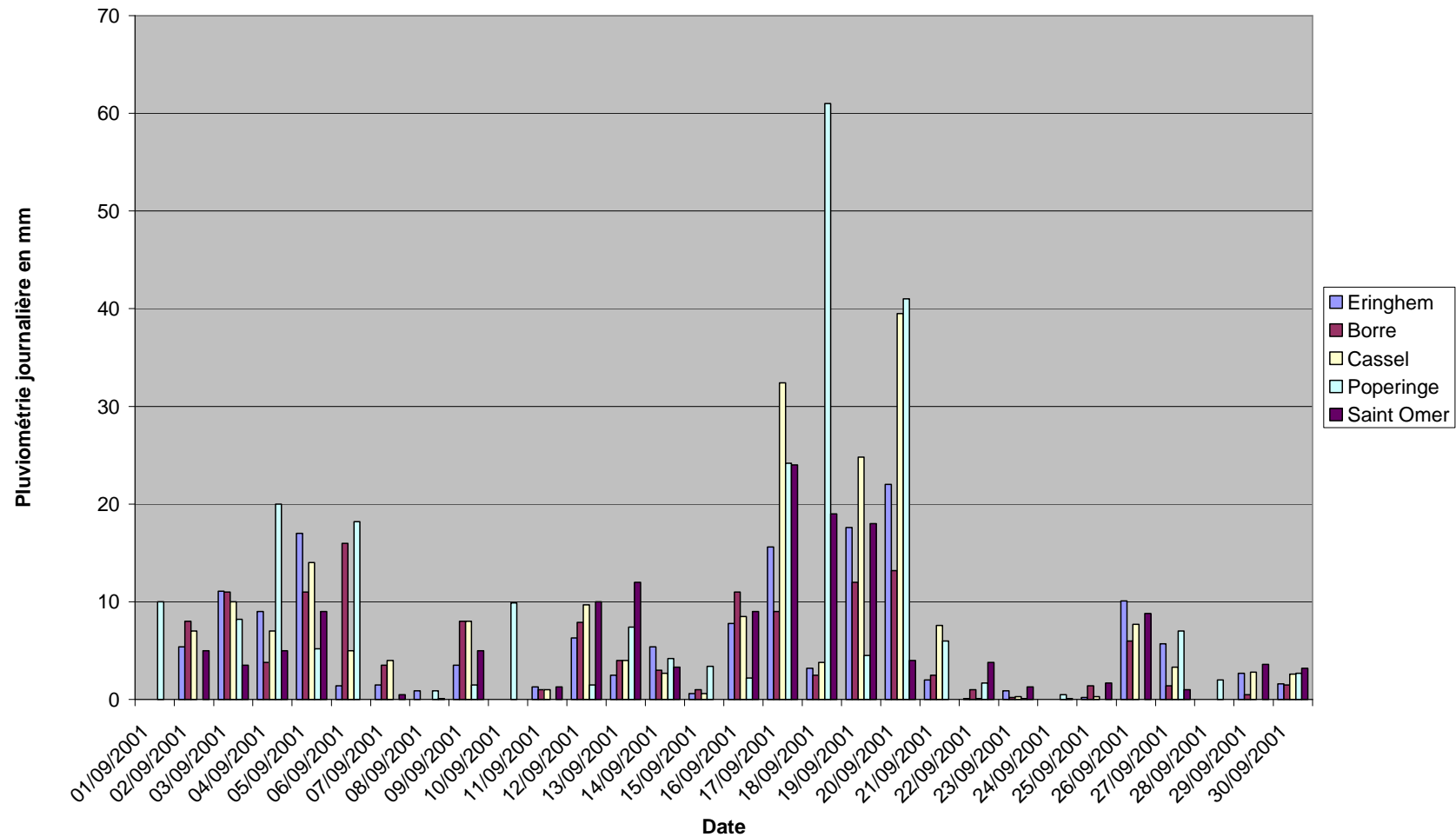


**ANNEXE 7 : ZONES D'INFLUENCE DES POSTES PLUVIOMETRIQUES DE SAINT
OMER, D'ERINGHEM, DE BORRE, DE CASSEL ET DE POPERINGE SUR LE BASSIN
VERSANT DE L'YSER**



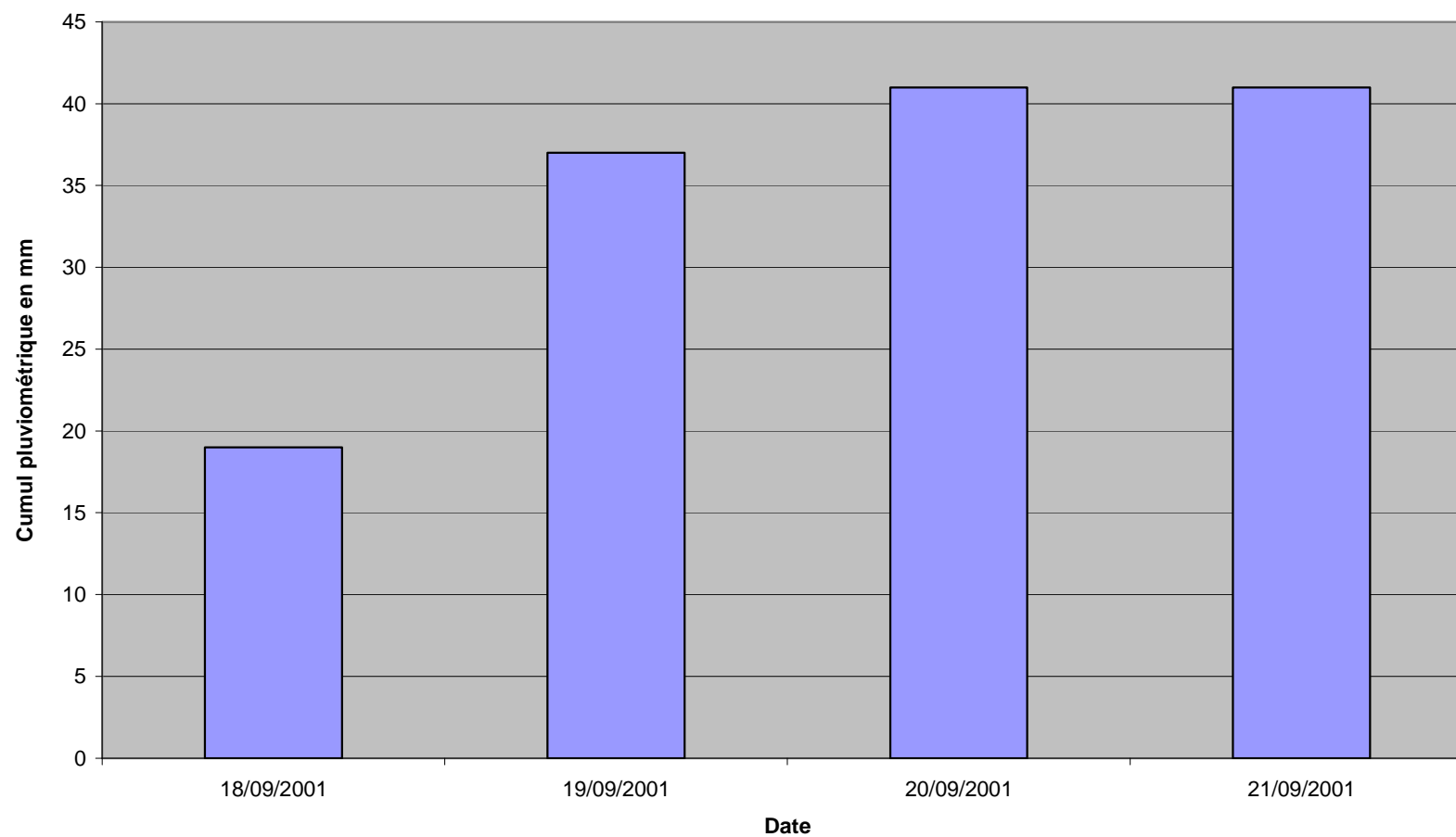
**ANNEXE 8 : PLUVIOMETRIE JOURNALIERE MESUREE DANS ET AUTOUR DU
BASSIN VERSANT DE L'YSER EN SEPTEMBRE 2001**

Pluviométrie journalière mesurée dans et autour du bassin versant de l'Yser

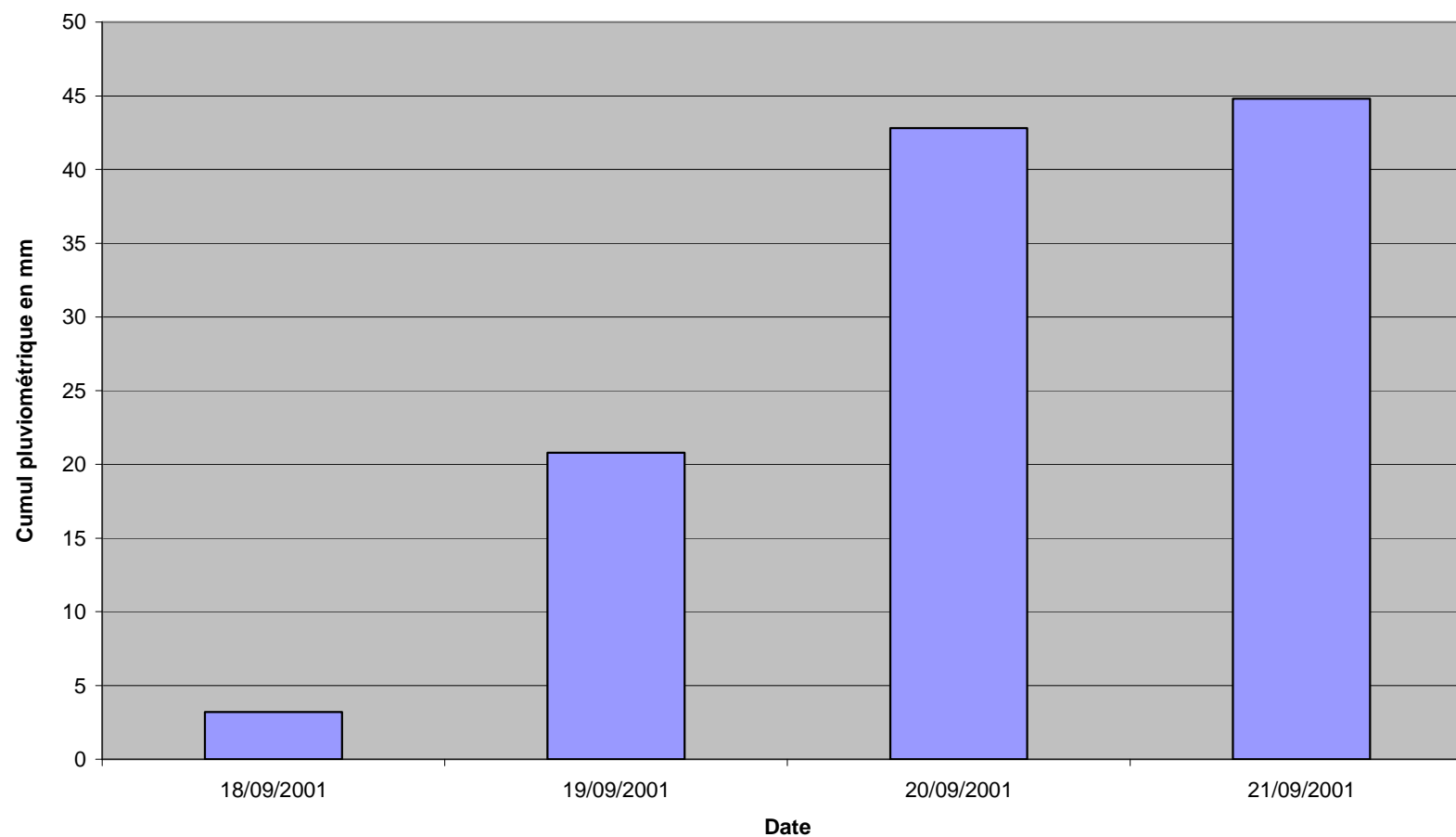


**ANNEXE 9 : HISTOGRAMMES DES CUMULS DE PLUIE ENREGISTRÉS ENTRE LE
18 ET LE 21 SEPTEMBRE 2001**

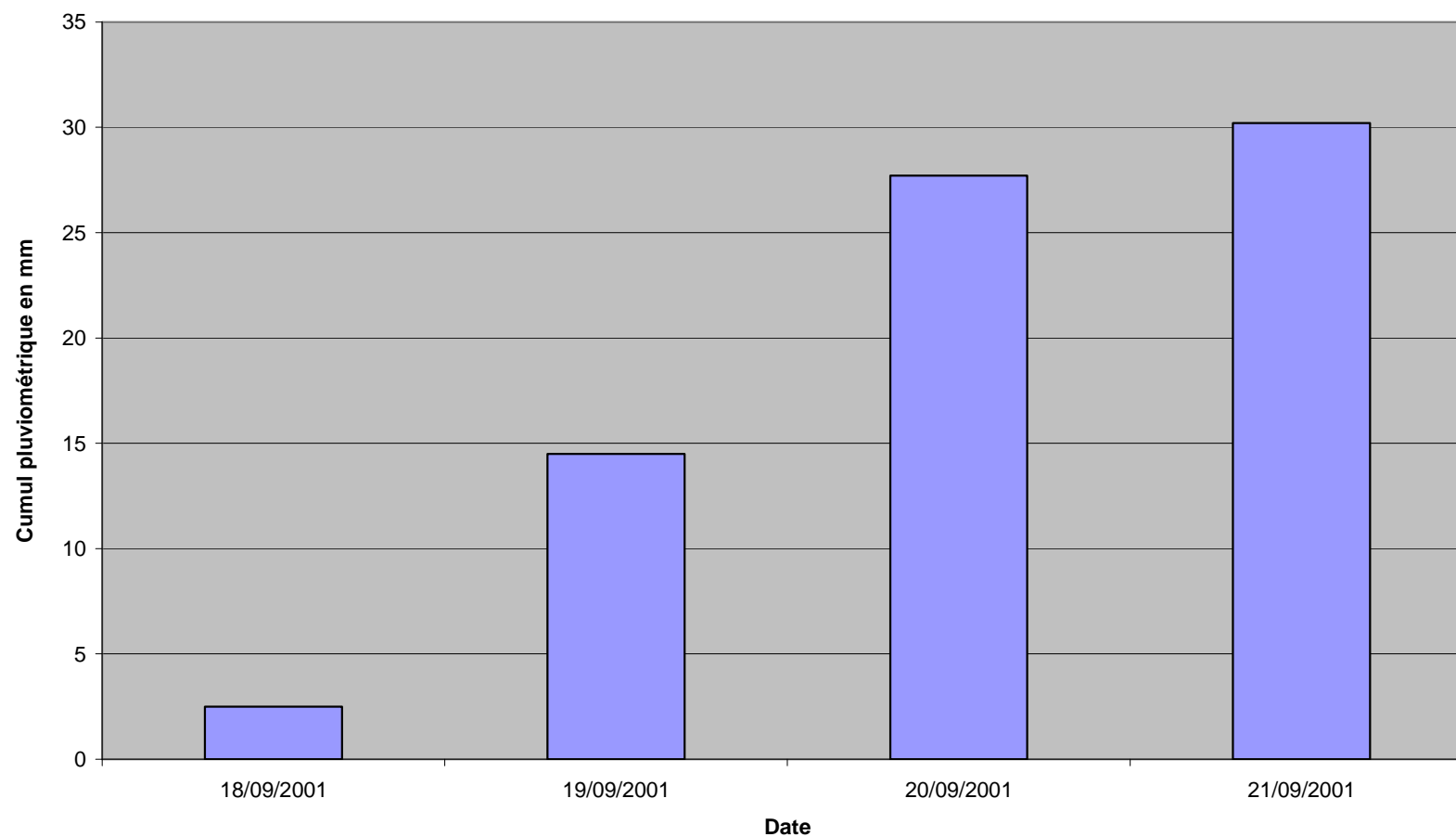
Saint Omer - histogramme du cumul de pluie du 18 au 21 septembre 2001



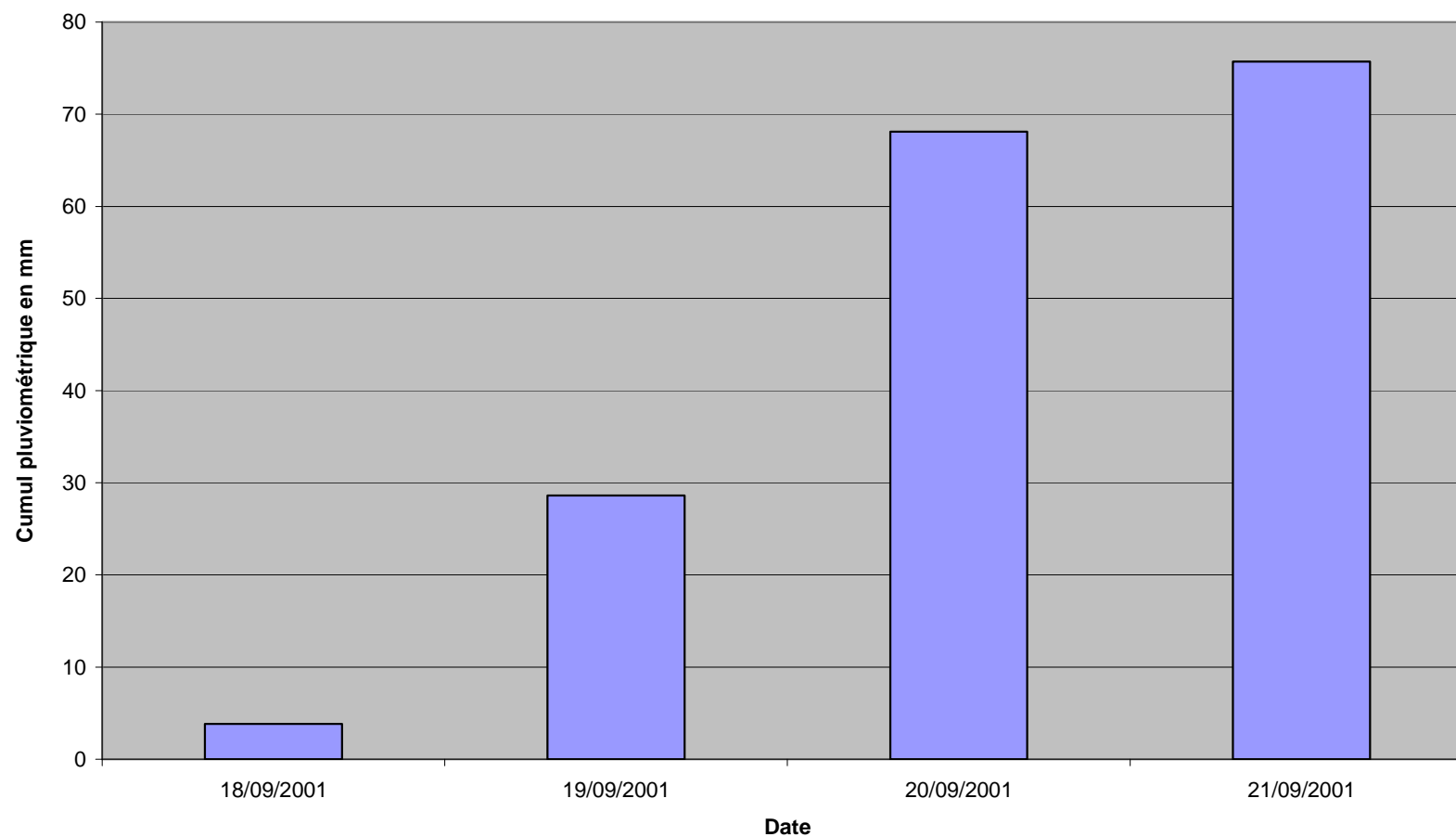
Eringhem - histogramme du cumul de pluie du 18 au 21 de septembre 2001



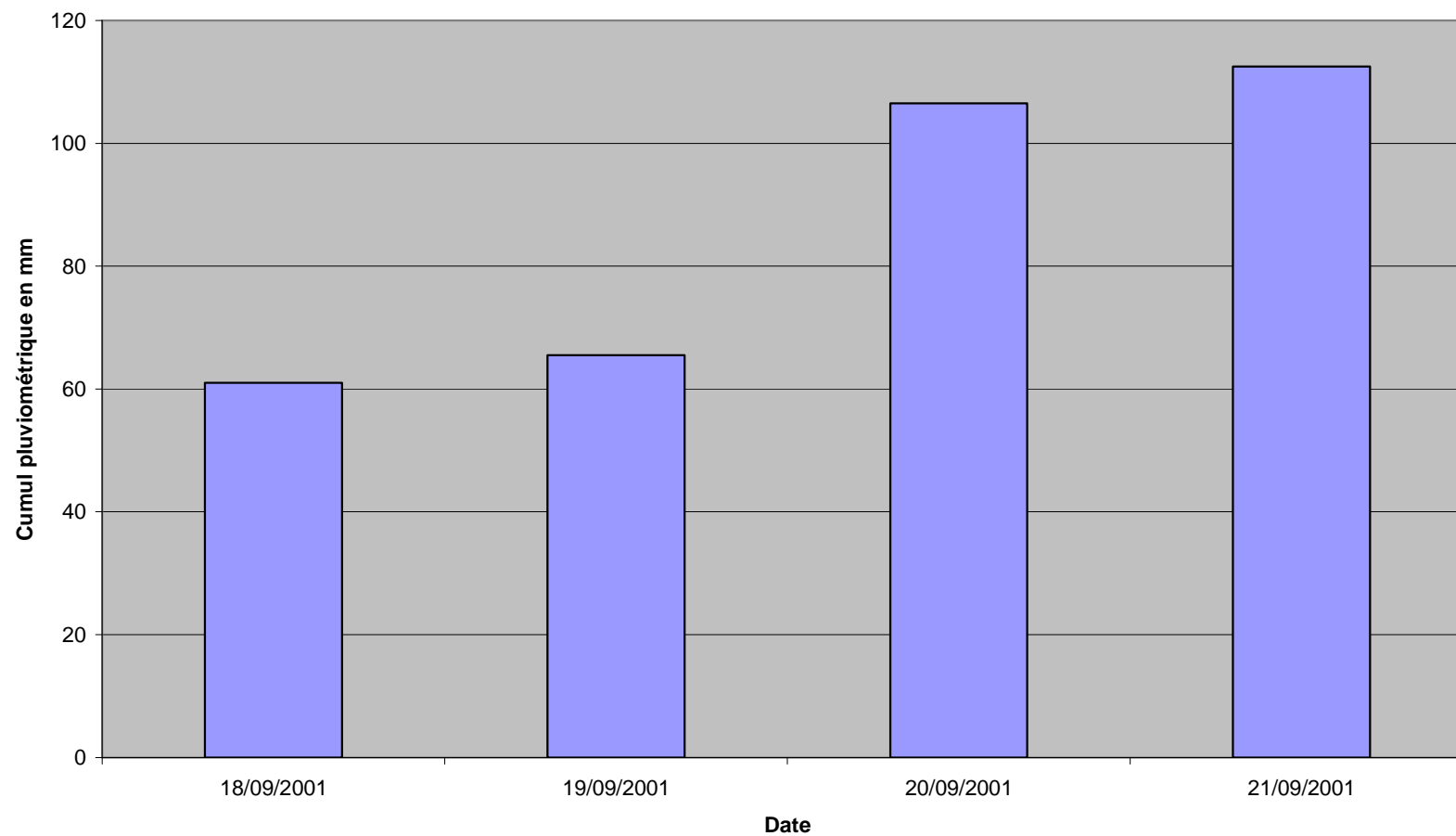
Borre - histogramme du cumul de pluie du 18 au 21 septembre 2001



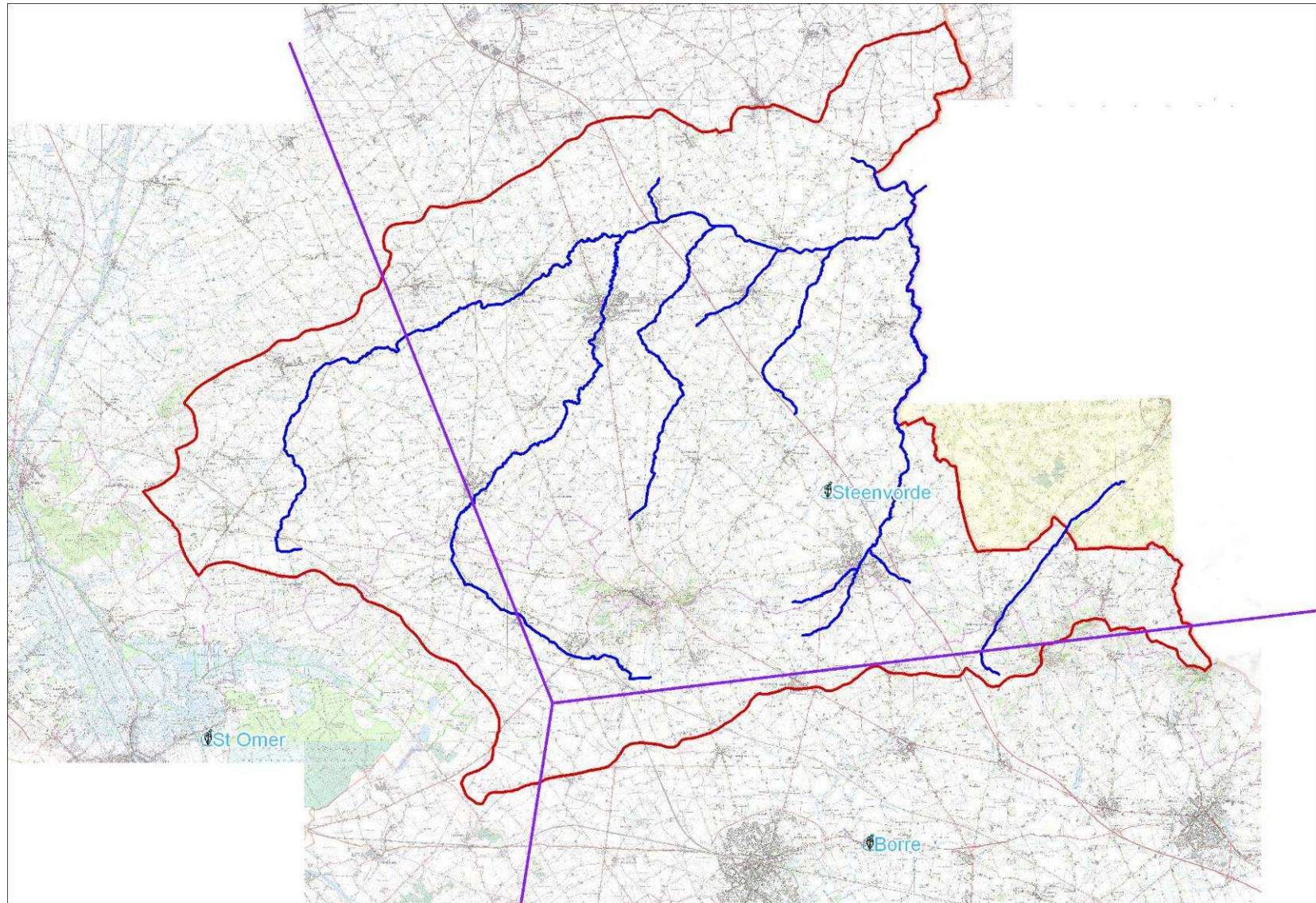
Cassel - histogramme des cumuls de pluie du 18 au 21 septembre 2001



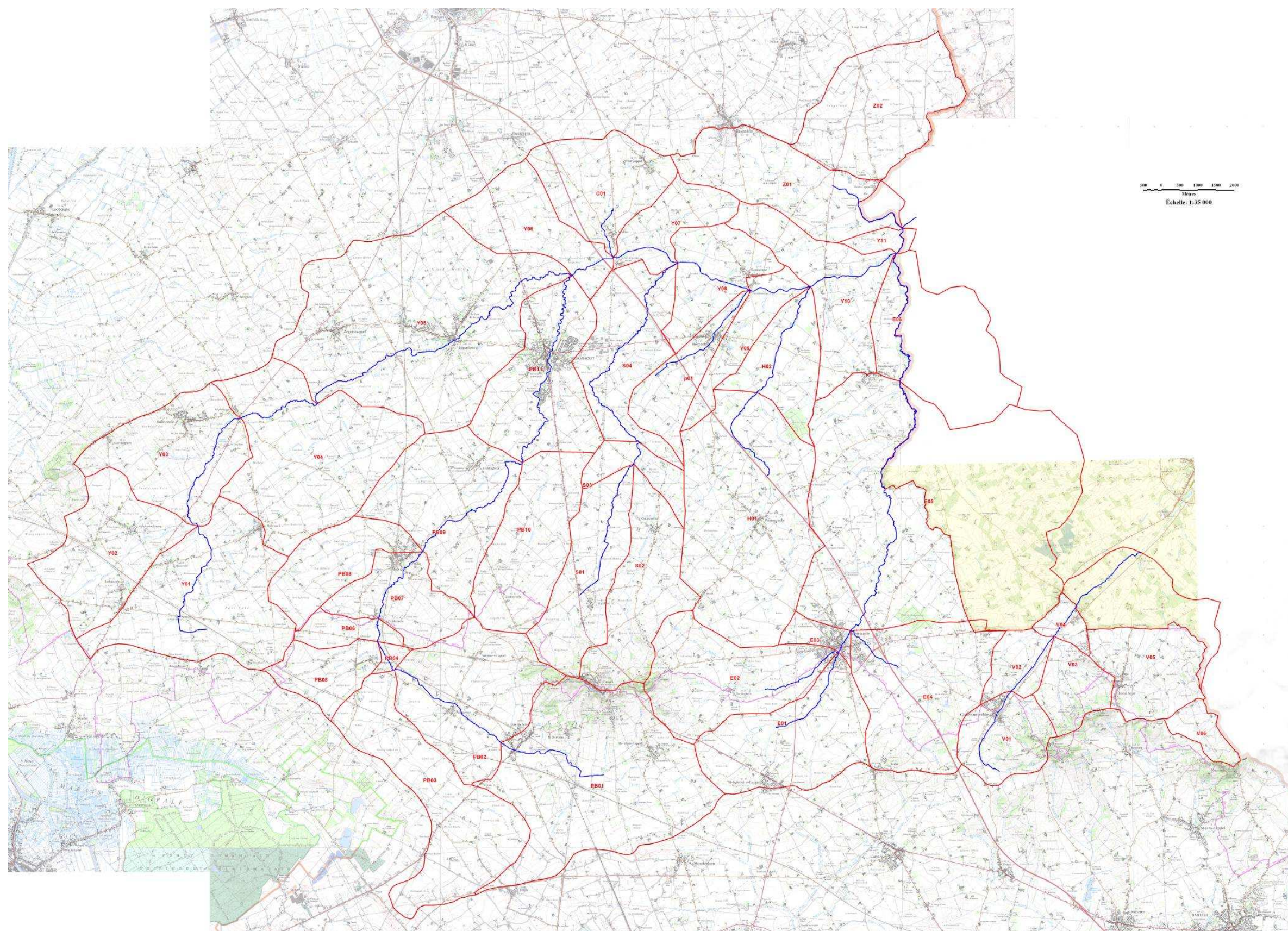
Poperinge - histogramme du cumul de pluie du 18 au 21 septembre 2001



**ANNEXE 10 : ZONES D'INFLUENCE DES POSTES PLUVIOMETRIQUES DE SAINT
OMER, DE BORRE ET DE STEENVOORDE SUR LE BASSIN VERSANT DE L'YSER**

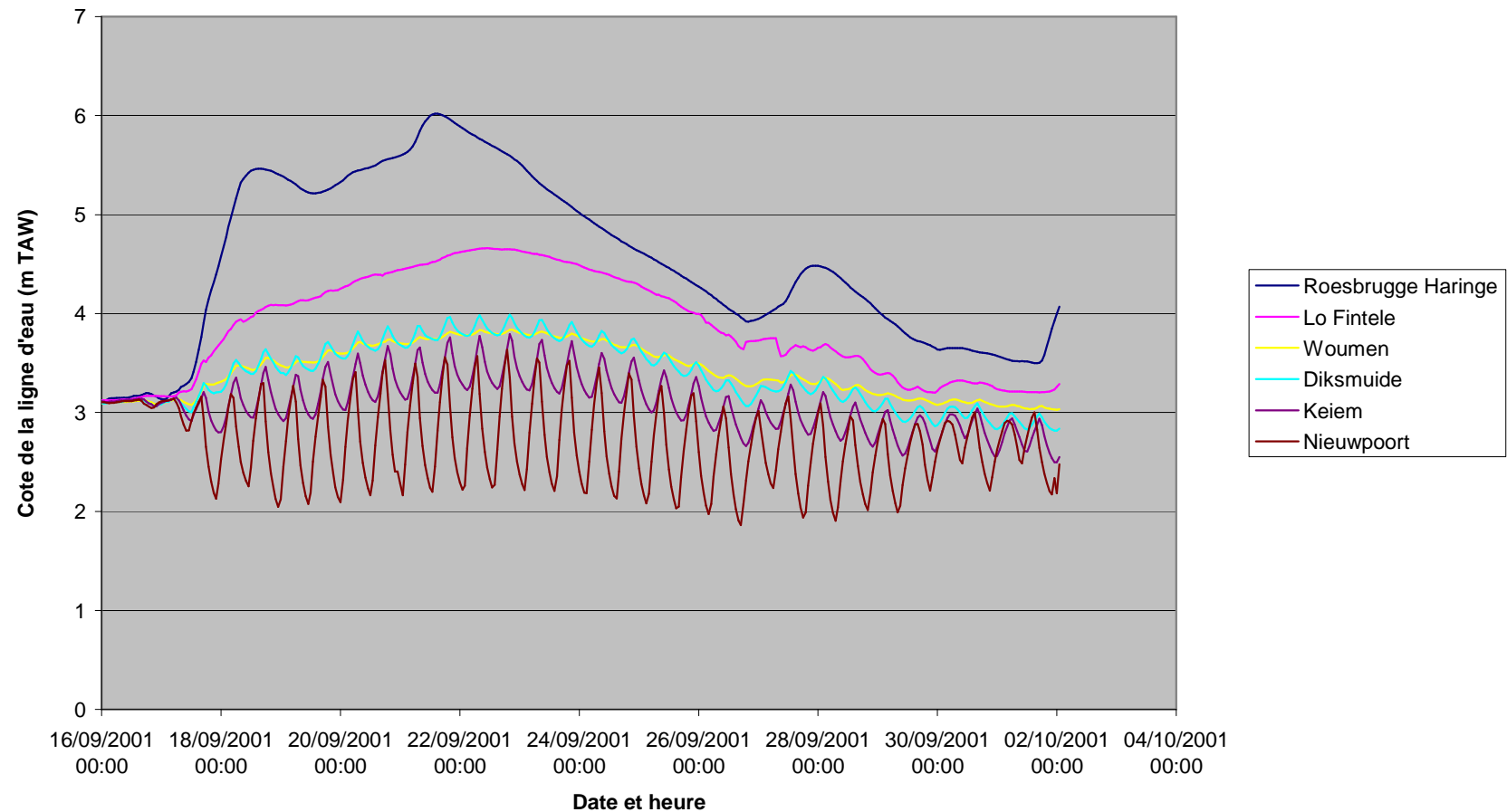


ANNEXE 11 : CARTE DES SOUS-BASSINS VERSANTS

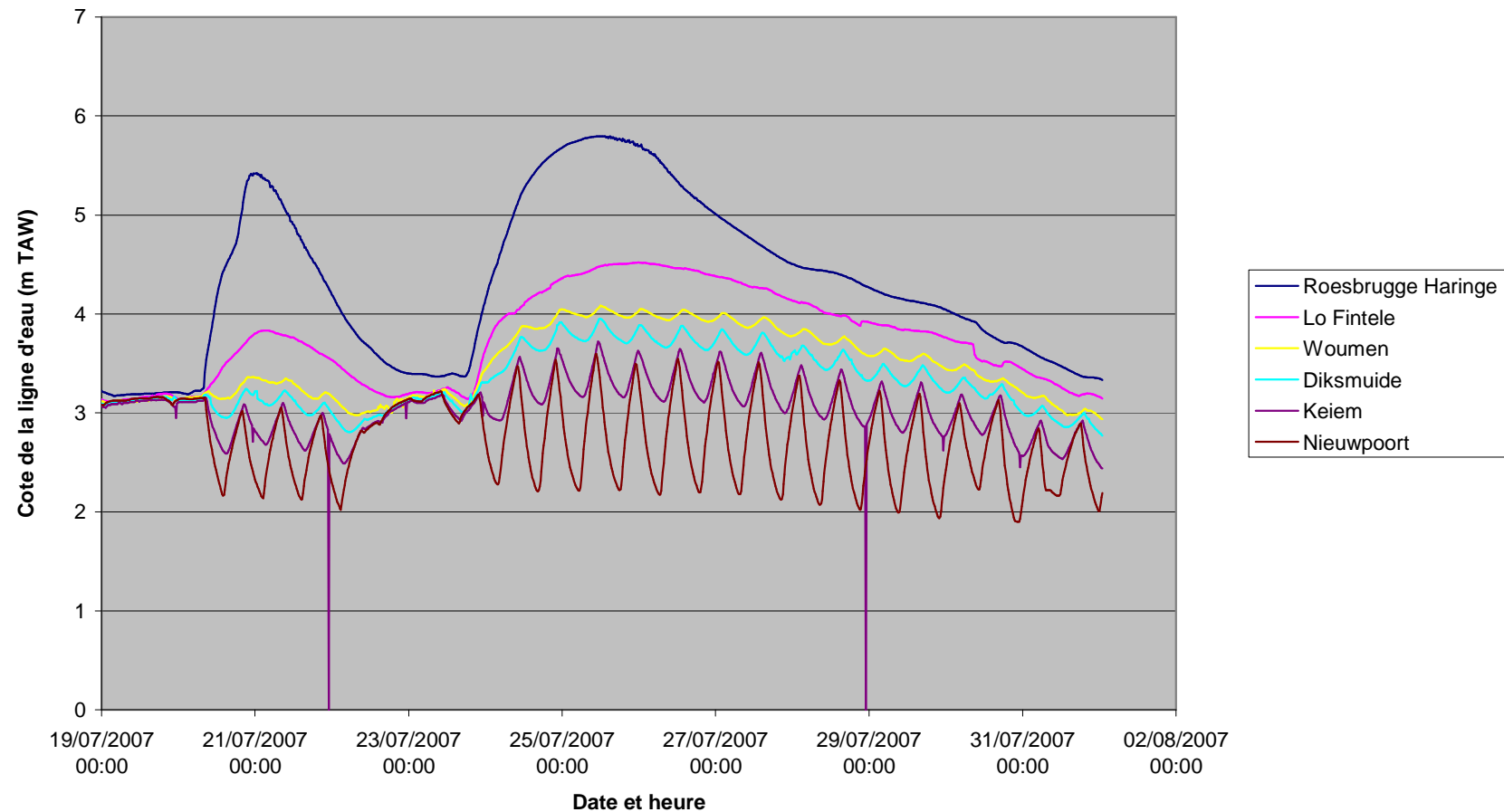


**ANNEXE 12 : LIMNIGRAMMES MESURES EN BELGIQUE LORS DES CRUES DE
SEPTEMBRE 2001 ET DE JUILLET 2007**

Données limnimétriques de l'Ijzer en Belgique en septembre 2001

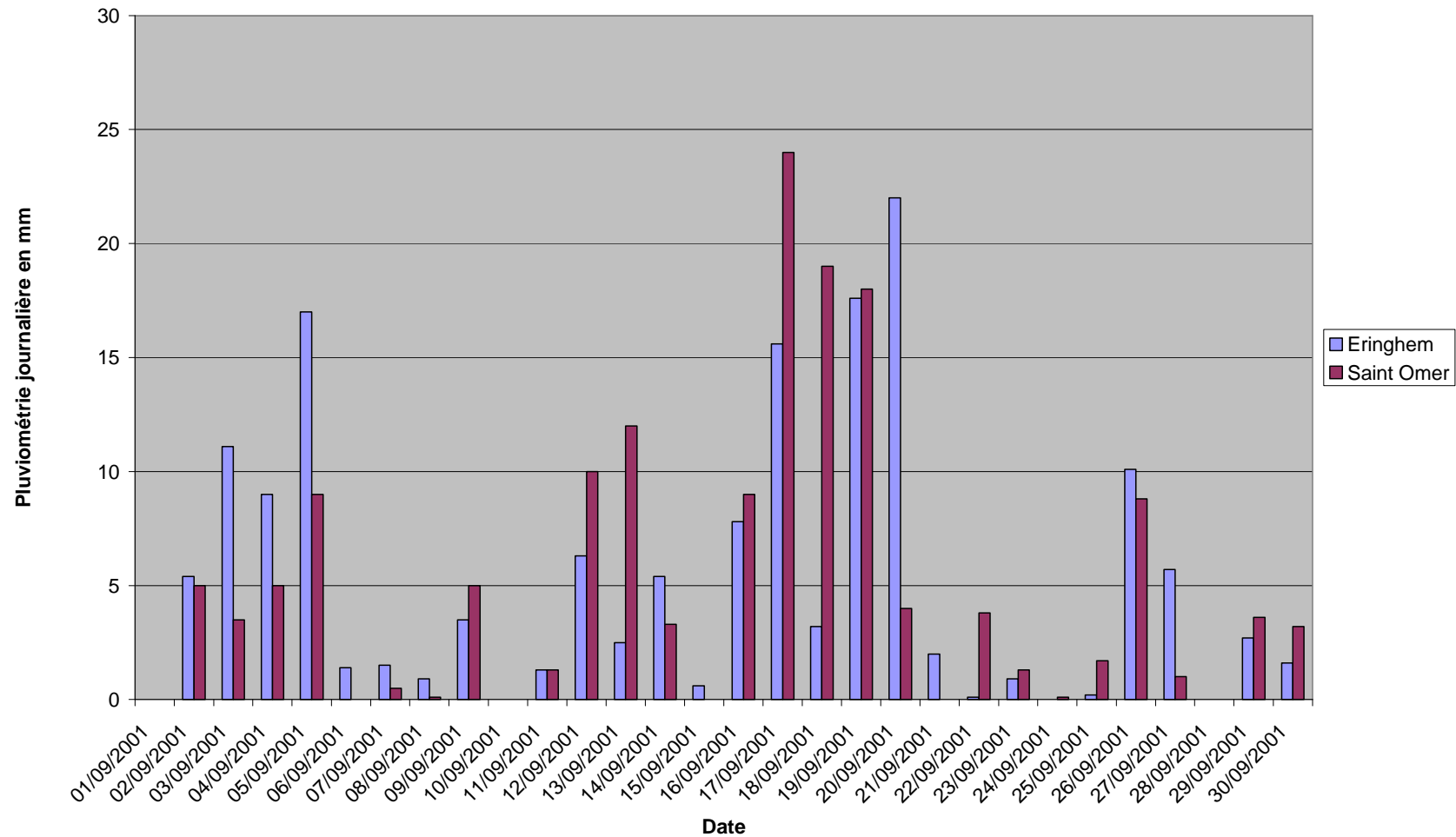


Données limnimétriques mesurées sur l'Ijzer en Belgique en juillet 2007



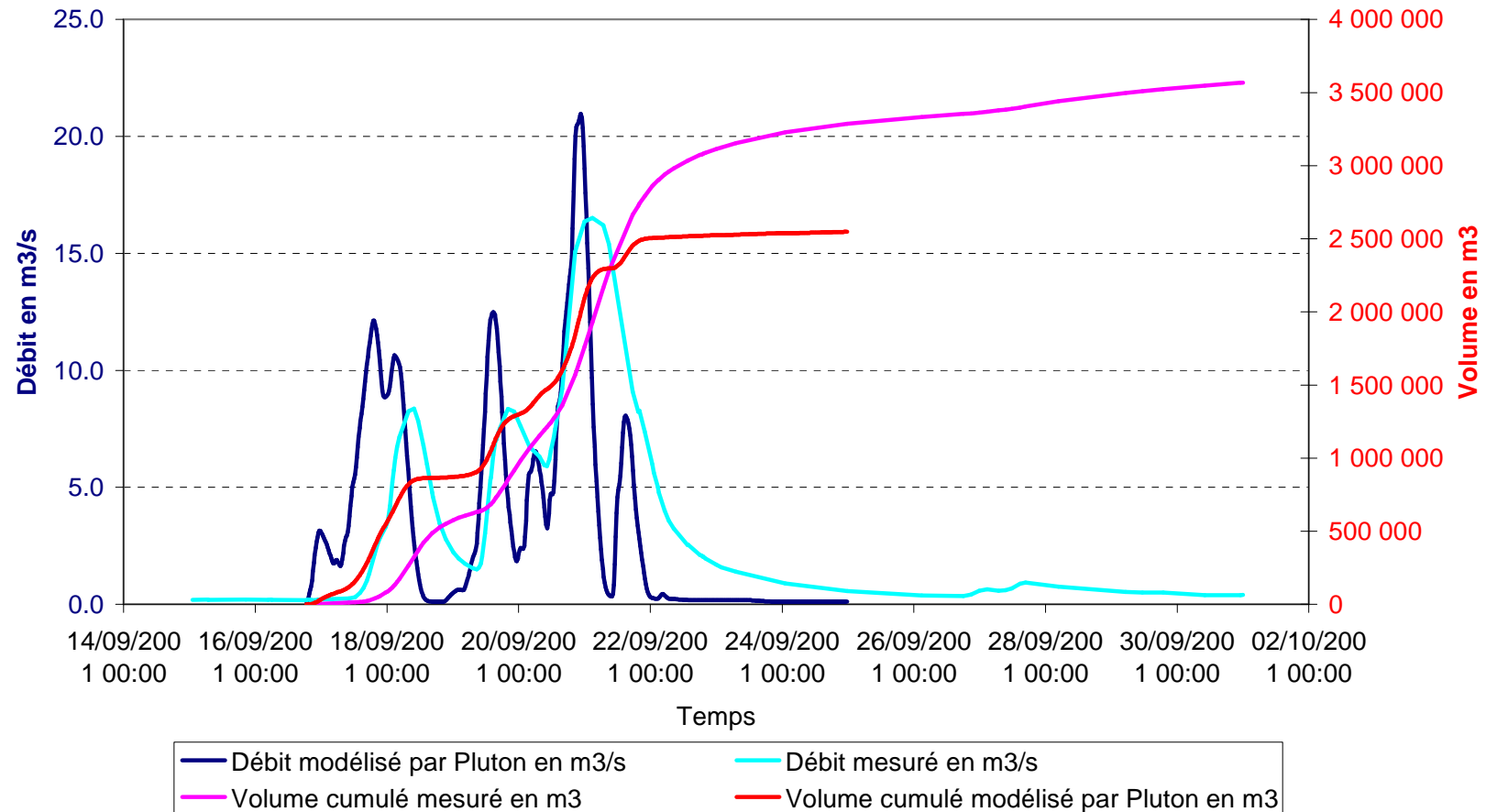
**ANNEXE 13 : PLUVIOMETRIE JOURNALIERE A BORRE ET A SAINT OMER EN
SEPTEMBRE 2001**

Pluviométrie journalière mesurée à Eringhem et Saint Omer en septembre 2001

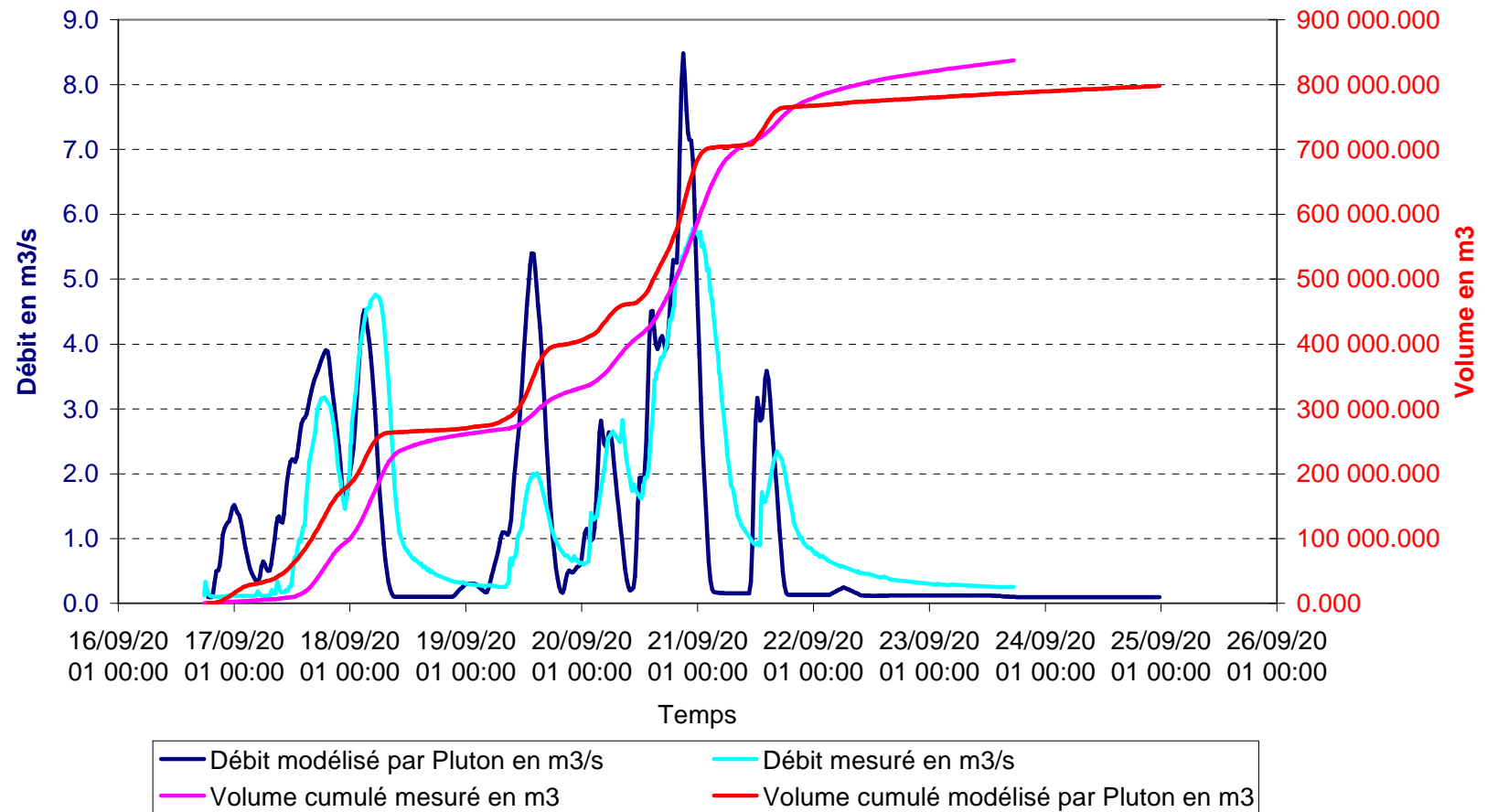


**ANNEXE 14 : HYDROGRAMMES MESURES ET MODELISES AUX STATIONS
HYDROMETRIQUES DU BASSIN VERSANT DE L'YSER EN SEPTEMBRE 2001**

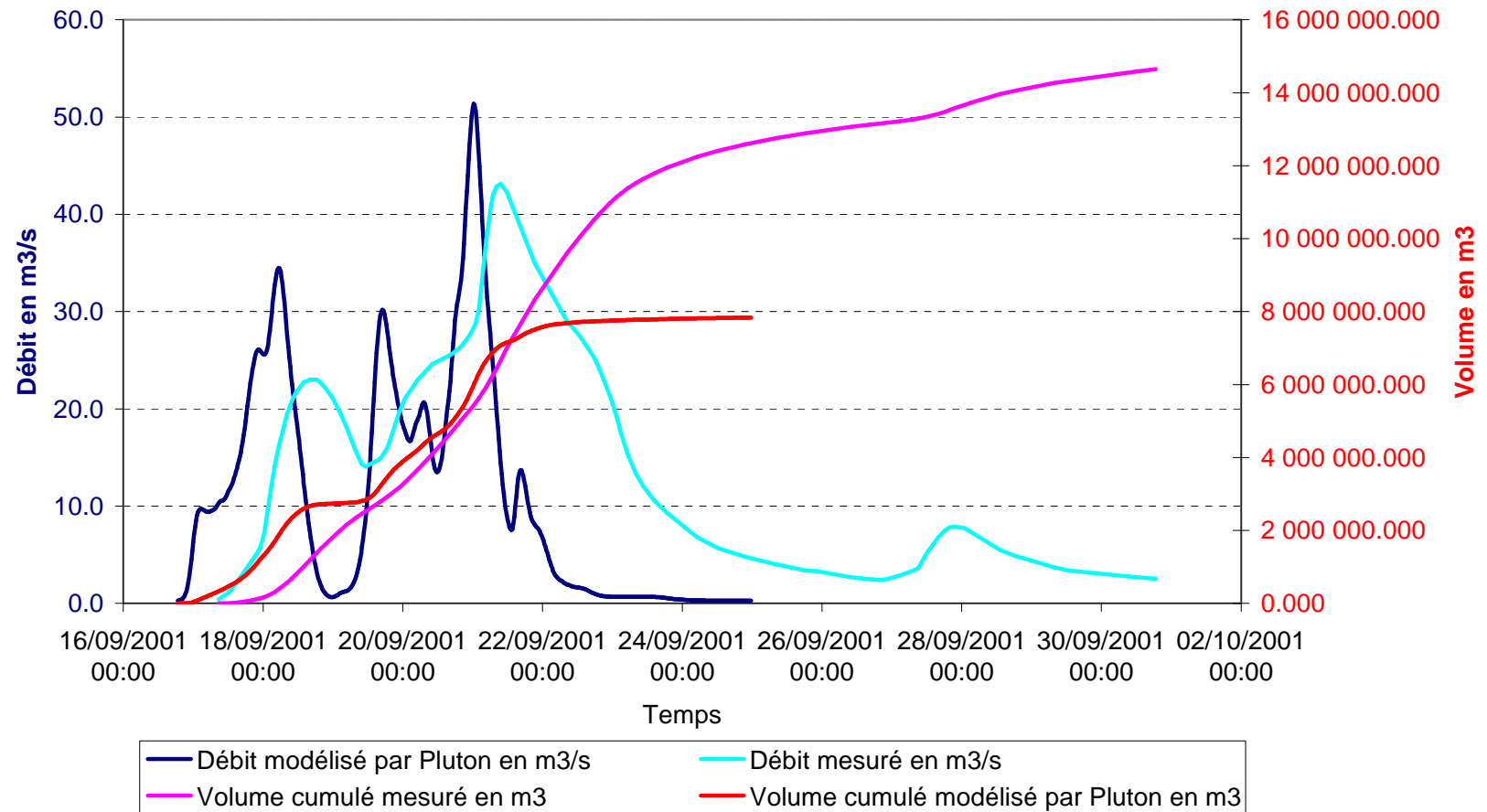
Station d'Ochtezeele - septembre 2001



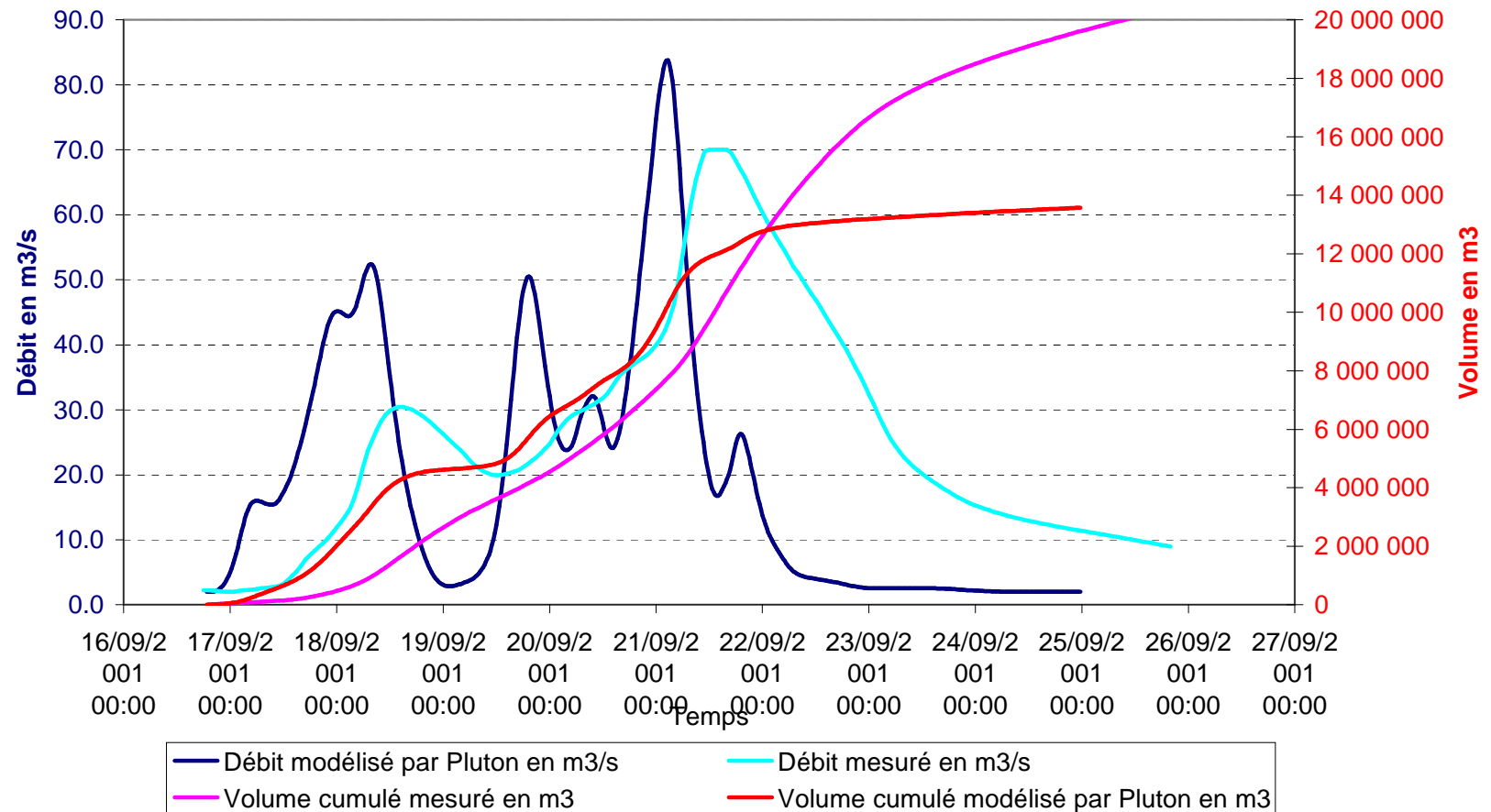
Station de Steenvoorde - septembre 2001



Station de Bambecque - septembre 2001



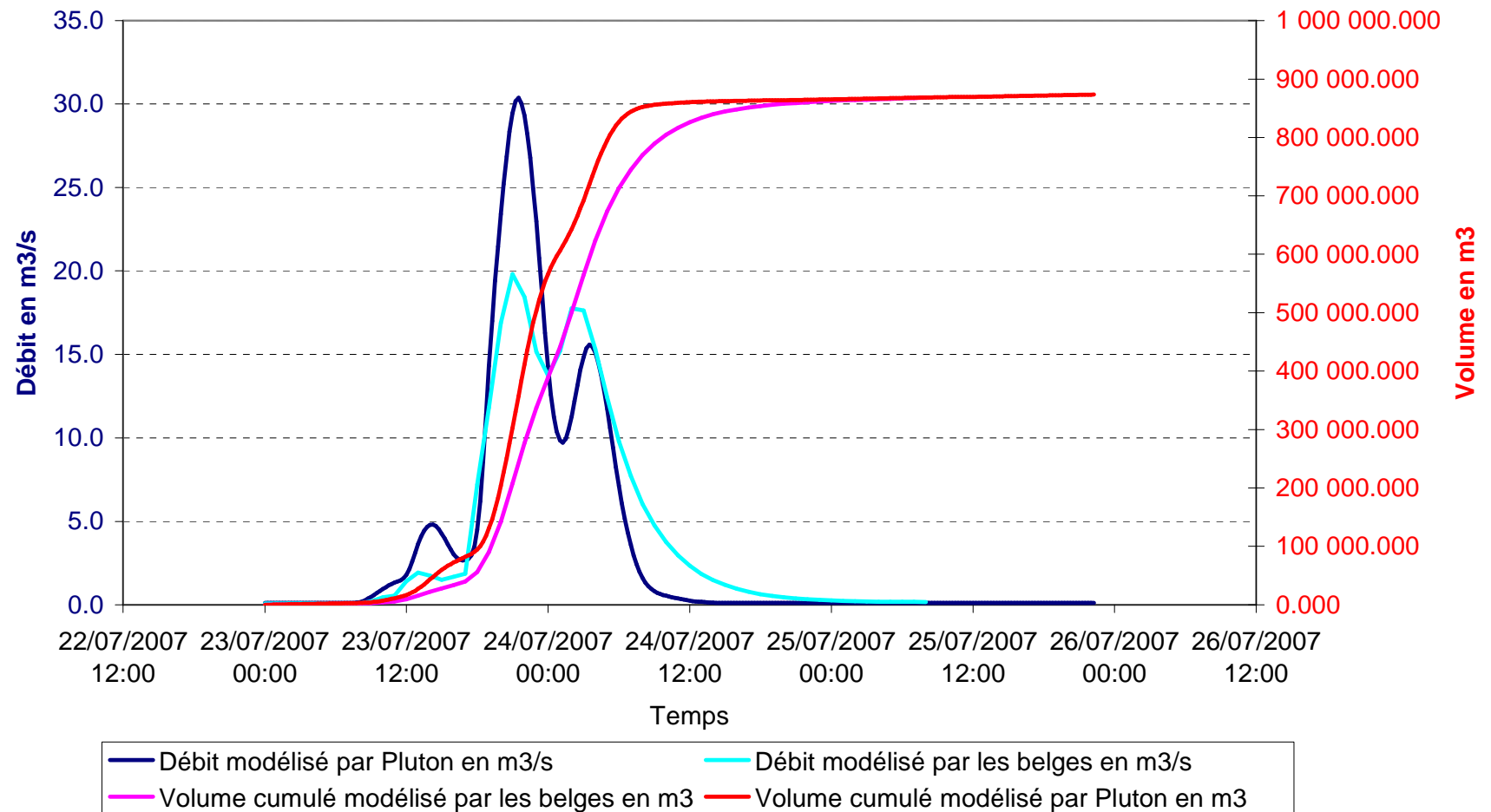
Station de Roesbrugge - septembre 2001



ANNEXE 15 : CARTE DES SOUS-BASSINS VERSANTS ET DES PENTES

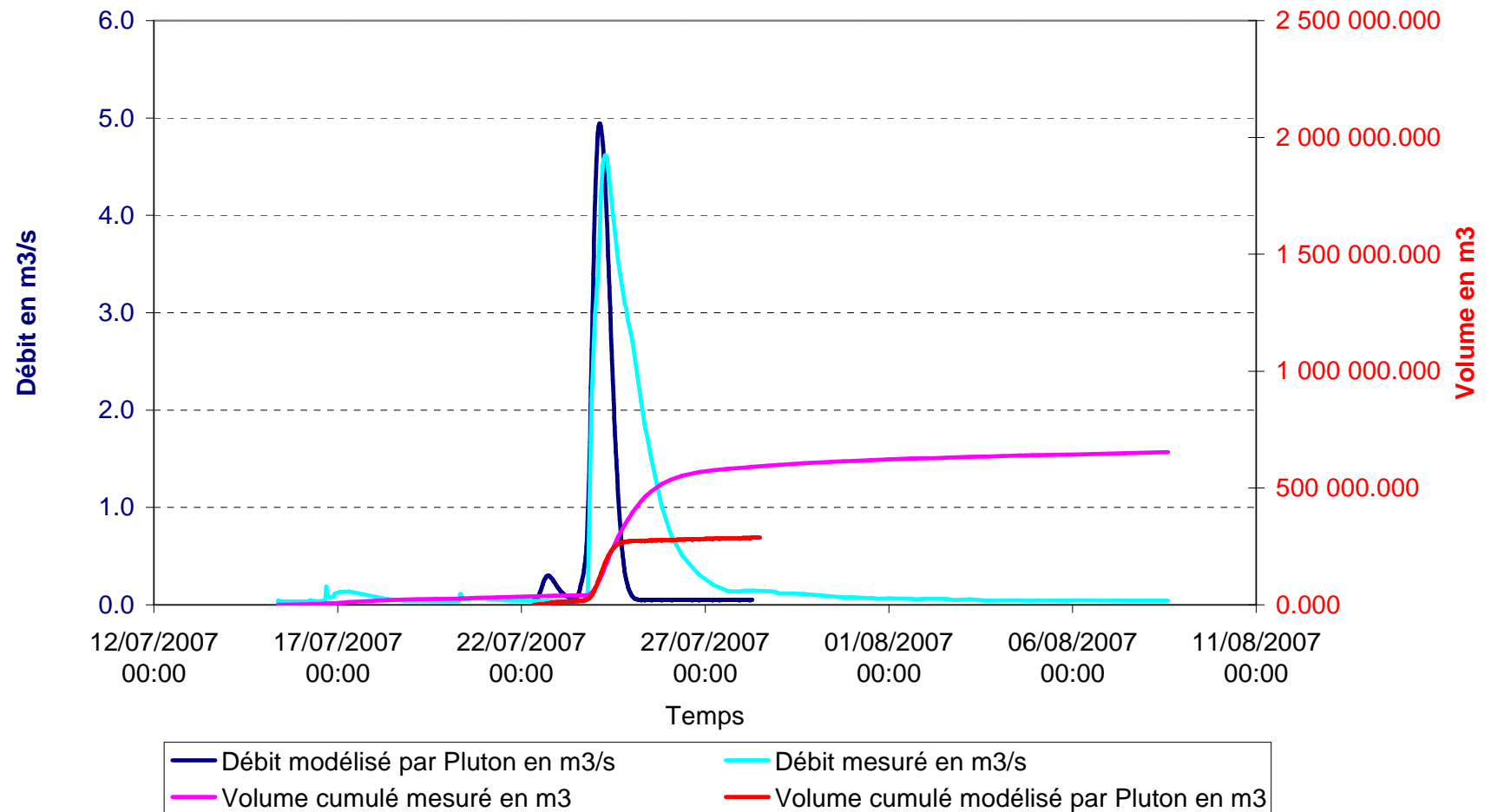
ANNEXE 16 : HYDROGRAMMES MODELISES PAR **PLUTON ET PAR LES
PARTENAIRES BELGES DE L'ÉTUDE EN AMONT DE LA CONFLUENCE ENTRE LA
VLETERBEEK ET LA WINTERBEEK EN JUILLET 2007**

Amont de la confluence entre la Vleterbeek et la Winterbeek - juillet 2007

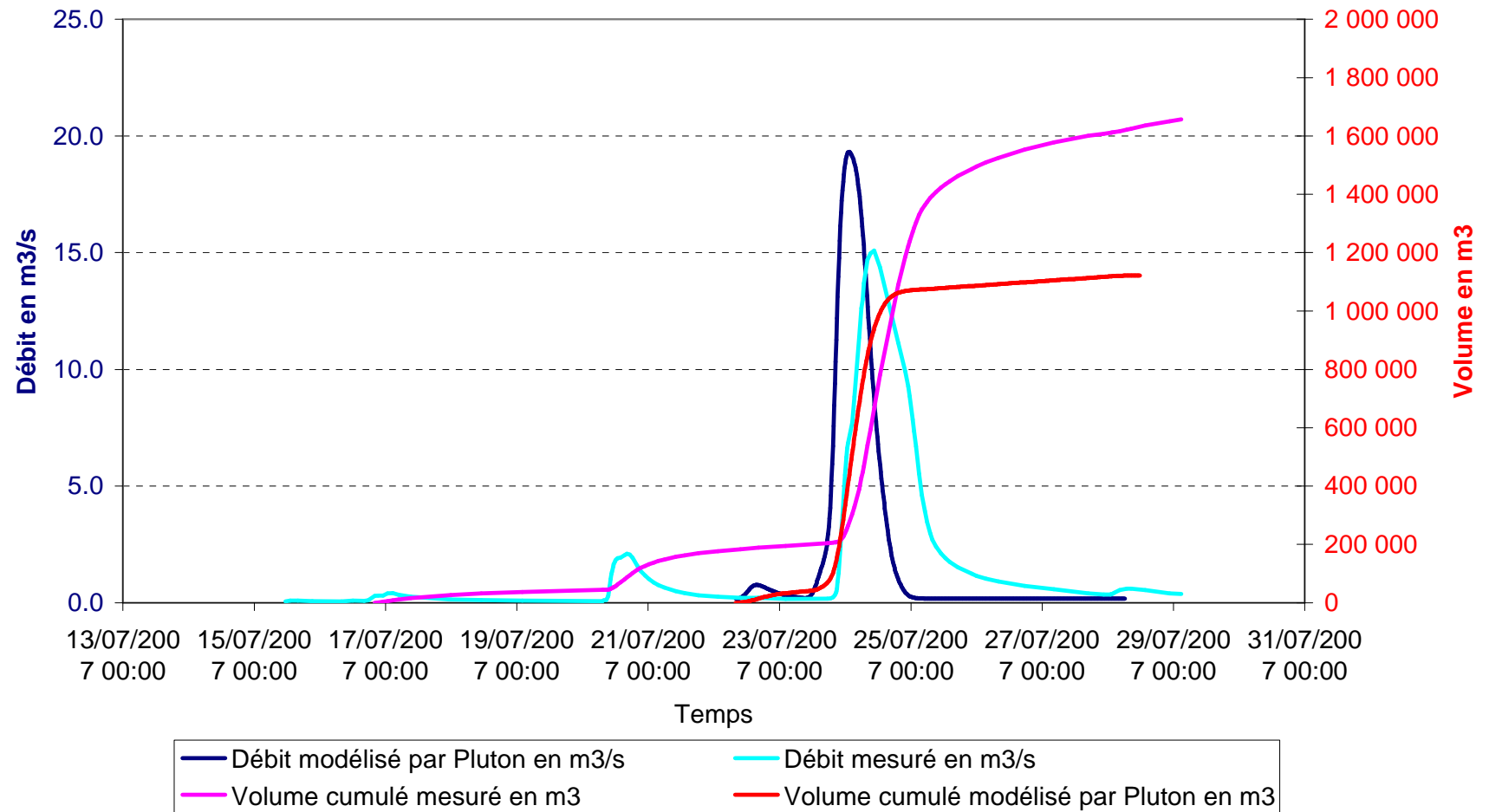


**ANNEXE 17 : HYDROGRAMMES MESURES ET MODELISES AUX STATIONS
HYDROMETRIQUES DU BASSIN VERSANT DE L'YSER EN JUILLET 2007**

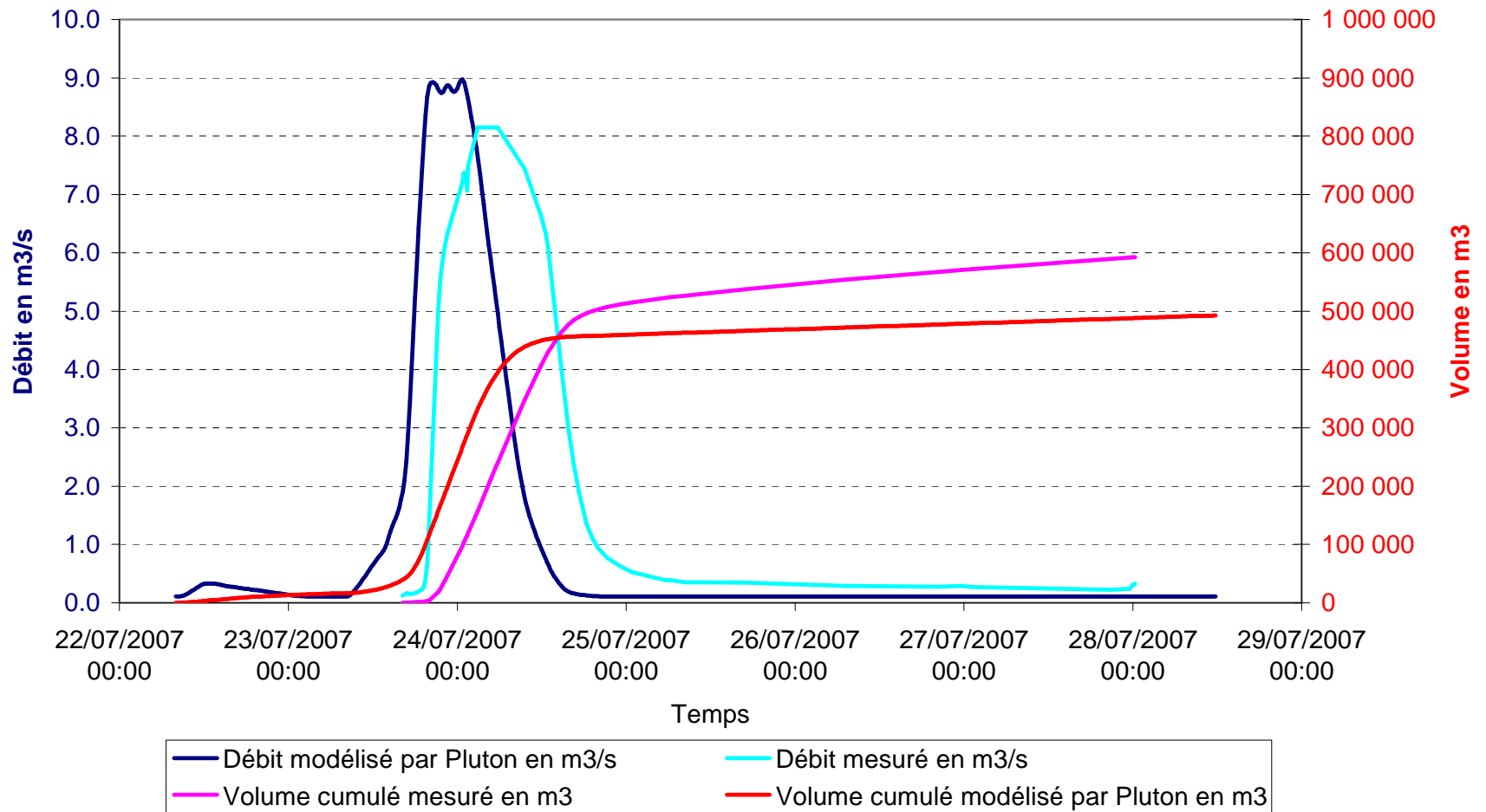
Station de Bollezeele - juillet 2007



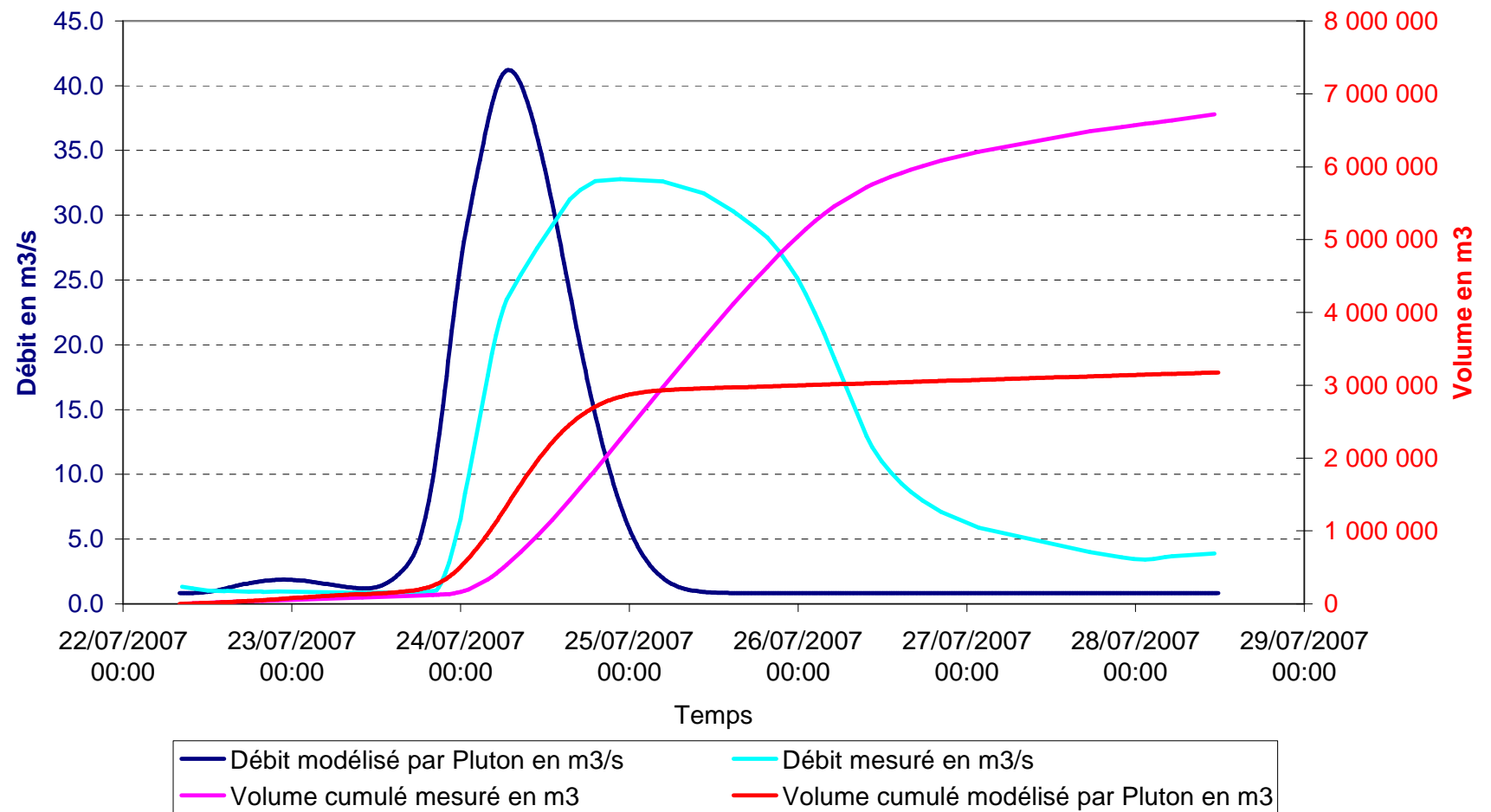
Station d'Ochtezeele - juillet 2007



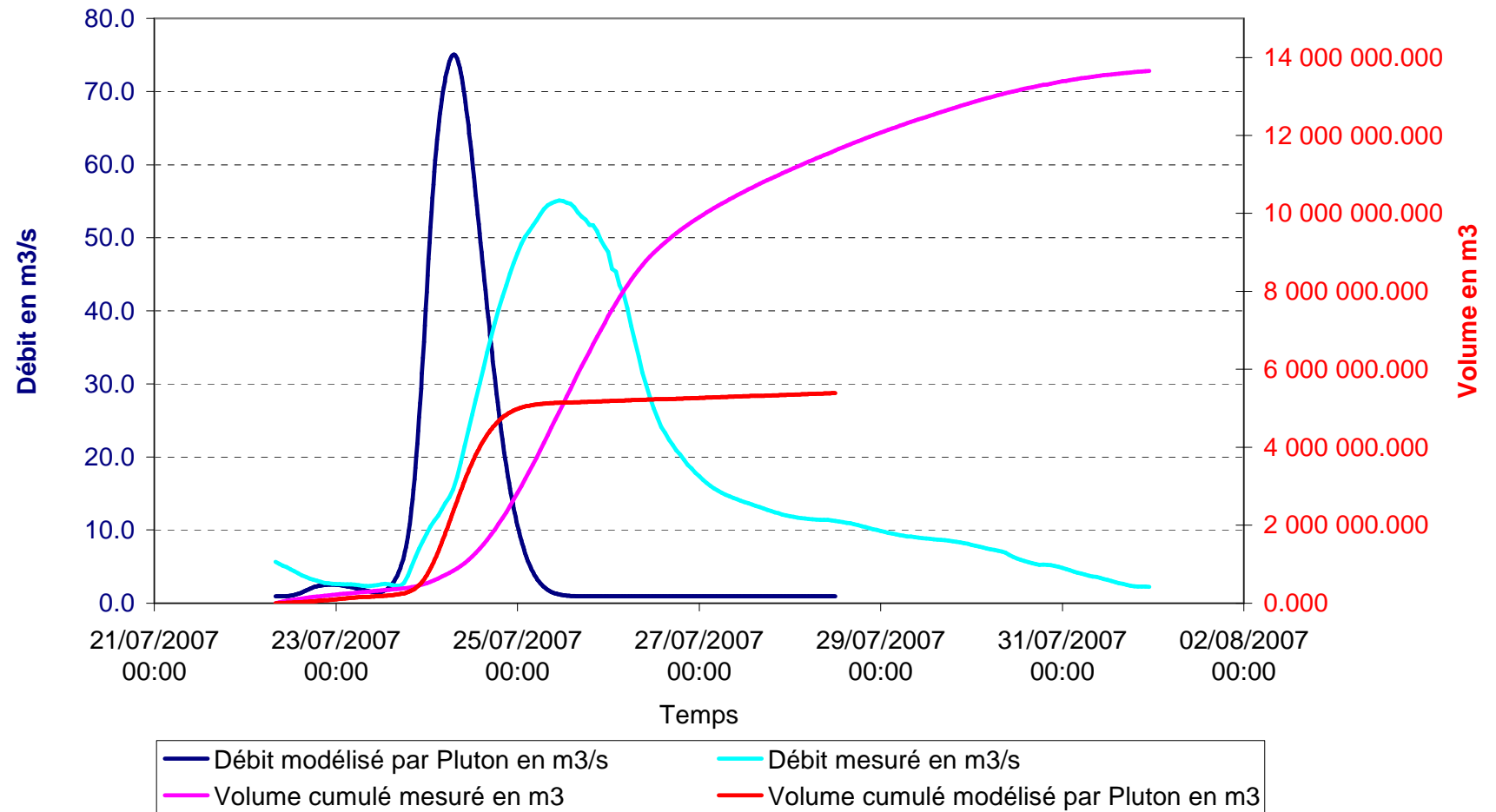
Station de Steenvoorde - juillet 2007



Station de Bambecque - juillet 2007



Station de Roesbrugge - juillet 2007



**ANNEXE 18 : CROISEMENT DES DONNEES DE PENTE ET DE
SENSIBILITE A LA BATTANCE DES SOLS SUR LE BASSIN VERSANT
DE L'YSER**

**ANNEXE 19 : REPARTITION PAR SOUS-BASSIN VERSANT DES ZONES
FORESTIERES, URBAINES ET DE PRAIRIES SUR LE BASSIN VERSANT DE L'YSER**

ANNEXE 20 : CARTOGRAPHIE DU MODELE

**ANNEXE 21 : SUPERPOSITION DES ZONES INONDEES CALCULEES PAR LE
MODELE ET OBSERVEES PAR PHOTOGRAPHIES AERIENNES EN SEPTEMBRE
2001**

Ces cartes sont fournies dans l'annexe cartographique qui accompagne le présent rapport.

**ANNEXE 22 : CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDEES CALCULEES PAR LE
MODELE SUR LE BASSIN VERSANT DE L'YSER EN JUILLET 2007**

Ces cartes sont fournies dans l'annexe cartographique qui accompagne le présent rapport.

**ANNEXE 23 : CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDEES CALCULEES PAR LE
MODELE SUR LE BASSIN VERSANT DE LA VLETER BECQUE EN JUILLET 2007**

Ces cartes sont fournies dans l'annexe cartographique qui accompagne le présent rapport.

**ANNEXE 24 : COEFFICIENTS DE MONTANA CALCULES A LA STATION LILLE
LESQUIN**

ANNEXE 25 : CARTES DES ZONES INONDEES POUR LES EVENEMENTS SIMULES

Ces cartes sont fournies dans l'annexe cartographique qui accompagne le présent rapport.