



# ETUDE DU FONCTIONNEMENT PHYSIQUE DU LIT DU FLEUVE VAR



RAPPORT D'ETUDE

JUIN 2003

N°0.81.5561

## SOMMAIRE

---

<b>SOMMAIRE</b> .....	<b>1</b>
<b>OBJET DE L'ETUDE</b> .....	<b>3</b>
<b>SYNTHESE ET CONCLUSION</b> .....	<b>5</b>
<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>7</b>
<b>1. BILAN DE L'ETAT DES CONNAISSANCES</b> .....	<b>9</b>
1.1 Aménagement de la basse vallée, historique et évolution.....	9
1.1.1. Jusqu'au XVIIème siècle .....	9
1.1.2. Le début du développement de la plaine.....	9
1.1.3. De l'après guerre à nos jours .....	9
1.2. Evolution du lit en plan et en altitude avant 1994.....	11
1.2.1. Evolution du lit en plan.....	11
1.2.1.1. Endiguement .....	11
1.2.1.2. Boisement et fermeture du lit.....	13
1.2.2. Evolution du lit en altitude.....	13
1.3. L'impact de la crue de 1994.....	14
1.4. L'évolution récente .....	15
1.4.1. De la confluence avec la Vésubie au seuil 16 .....	15
1.4.2. Du seuil 16 à l'Estéron.....	17
1.4.3. L'Estéron .....	19
1.4.4. De l'Estéron au torrent de Saint-Blaise.....	21
1.4.5. Du torrent de Saint-Blaise au seuil 10 .....	21
1.4.6. Du seuil 10 au seuil 9.....	21
1.4.7. Du seuil 9 au seuil 8.....	25
<b>2. Etude du retour du transport solide</b> .....	<b>26</b>
2.1. LES DONNEES DE BASE .....	26
2.1.1. Les données topographiques .....	26
2.1.2. Hydrologie .....	27
2.1.3. Granulométrie .....	28
2.1.3.1. Granulométrie Pradon .....	28
2.1.3.2. Granulométrie 2002 .....	29
2.1.3.2.1. Mesures effectuées .....	29
2.1.3.2.2. Corrélation entre les différents modes de prélèvement .....	34
2.1.3.2.3. Analyse des granulométries .....	41
2.1.3.3. Bilan .....	52
2.1.3.4. Choix de la granulométrie pour la simulation avec le programme MORMO .....	52
2.2. Situation actuelle.....	55
2.2.1. Profil en long 2002 .....	55
2.2.2. Analyse du bief seuil 9 - seuil 10.....	57

2.2.3.	Calage du modèle MORMO .....	59
2.2.4.	Régime actuel du charriage.....	66
<b>2.3.</b>	<b>Evolution prévisible dans la situation actuelle.....</b>	<b>68</b>
2.3.1.	Hydrologie .....	68
2.3.2.	Simulation de référence .....	70
<b>2.4.</b>	<b>Solutions d'aménagement.....</b>	<b>76</b>
2.4.1.	Analyse du phénomène d'abaissement d'un seuil.....	76
2.4.1.1.	1 <sup>er</sup> cas .....	76
2.4.1.2.	2 <sup>ème</sup> cas .....	78
2.4.2.	Modélisation de l'abaissement d'un seuil grâce au logiciel MORMO .....	79
2.4.3.	Description des scénarios.....	80
2.4.3.1.	Scénario global.....	80
2.4.3.2.	Variante sans abaissement du seuil 10 .....	91
2.4.3.3.	Bec de l'Estéron .....	91
2.4.4.	Conclusion des solutions d'aménagement .....	92
2.4.4.1.	Présentation.....	92
2.4.4.2.	Impact .....	93
2.4.4.3.	Chiffrage sommaire de la solution proposée .....	98
<b>3.</b>	<b>Observatoire du Var.....</b>	<b>100</b>
3.1.	EVOLUTION ALTIMETRIQUE DES FONDS MOYENS.....	100
3.1.1.	Vallée du Var : .....	100
3.1.2.	Esteron et Var amont : .....	101
3.1.3.	Suivi photographique.....	102
3.1.4.	Suivi hydrologique.....	102
3.1.5.	Suivi granulométrique.....	103
<b>ANNEXE – NOTICE MORMO .....</b>	<b>104</b>	

---

## OBJET DE L'ETUDE

---

La Basse Vallée du Var a connu, au cours des 50 dernières années, une évolution extrêmement sensible.

Celle-ci est due :

- D'une part, à une mutation très sensible de l'affectation des espaces disponibles de la plaine, celle-ci se transformant d'un espace agricole en une zone péri-urbaine. La rapidité de cette urbanisation est une des caractéristiques majeures de la zone d'étude. Elle est renforcée par la présence des principales voies de communication (actuelles et futures) en bordure immédiate du lit mineur.
- D'autre part, aux besoins très forts en matériaux alluvionnaires liés au développement de la Côte d'Azur. L'exploitation, démesurée, du gisement alluvionnaire du Var a entraîné un très fort abaissement du lit (constaté dès le début des années 1970). Pour stabiliser l'évolution, mais aussi pour pouvoir poursuivre les extractions, l'ensemble de la basse vallée a été réorganisé autour de 11 seuils. Cette artificialisation très forte de la vallée engendre des problèmes tout à fait spécifiques :
  - L'évolution des fonds, et notamment le remplissage des fouilles d'extraction, nécessite une gestion très précise pour limiter les risques d'inondation,
  - Les nappes d'accompagnement du Var, qui sont une des ressources stratégiques pour l'approvisionnement en eau des Alpes Maritimes, sont directement liées au lit du fleuve. Leur protection, tant quantitative que qualitative, doit être prise en considération avant toute mise en œuvre de stratégie d'aménagement de la basse vallée,
  - La rupture du transit sédimentaire par les seuils et les extractions a entraîné le développement de milieux naturels exogènes très contrastés avec les milieux naturels classiques assortis à un lit en tresse. Les orientations fondamentales du SDAGE RMC mettent clairement en évidence la nécessité de respecter le fonctionnement naturel des milieux et de restaurer d'urgence les milieux particulièrement dégradés. Dans cette optique la CLE de la Basse Vallée du Var s'est prononcée, préalablement à notre étude, pour orienter tous ses efforts vers un retour de la basse vallée à un fonctionnement hydraulique « naturel », avec rétablissement d'un transport solide intense et gestion du risque inondation au moyen d'un abaissement raisonné des seuils.

L'évolution passée de la basse vallée nécessite d'être analysée et mise en perspective, afin que la CLE du SAGE Var puisse se prononcer valablement sur la définition d'un scénario d'aménagement cohérent avec cette volonté stratégique de développement.

La définition de stratégies précises de gestion du lit du Var, entre ses digues, apparaît comme un préalable indispensable et prioritaire à cette approche globale.

L'objectif de l'étude du fonctionnement physique du lit du fleuve Var sera donc :

- De formaliser le bilan de l'état des connaissances accumulées depuis quelques années sur le fonctionnement physique du fleuve,
- D'étudier précisément les conditions de la reprise du transit sédimentaire dans la basse vallée,

- De définir des stratégies précises d'aménagement et de gestion de la basse vallée, en dégageant de manière explicite les enjeux, les contraintes et les impacts.

---

## SYNTHESE ET CONCLUSION

---

Le retour du transport solide dans la basse vallée du Var est un élément clef de la stratégie future de la gestion de ce fleuve. Il s'accompagne d'une modification très sensible des faciès morphologiques, par érosion des terrasses limoneuses et réengrèvement générale des biefs entre seuils.

Les prélèvements granulométriques effectués dans les biefs seuil 9-seuil 10 a permis de préciser les mécanismes de réengrèvement et d'érosion des limons, ainsi que les volumes de graviers nécessaires à un réengrèvement complet, soit environ 300 000 m<sup>3</sup> par bief.

La situation actuelle dans la basse vallée est aujourd'hui contrastée :

- A l'amont du seuil n°16, les pentes sont localement faibles, notamment, du fait des extractions passées à la confluence de la Vésubie et à l'amont de La Mescla
- Entre le seuil 16 et le seuil 10, la pente est relativement forte. La tendance est à l'érosion, ce qui met en danger la stabilité du seuil 16
- A l'aval, le bief seuil 9-seuil 10 est totalement réengravé et les matériaux sont de retour jusque dans le tronçon du seuil 9 au seuil 8. L'arrivée de ces matériaux s'accompagne d'un retour à des pentes d'équilibre et à un faciès naturel. Cela s'accompagne également d'une aggravation du risque d'inondation.
- A l'aval du seuil 4, par contre, les matériaux ne seront pas de retour avant plusieurs décennies, ce qui pose le problème de la protection des berges et des ouvrages du fait de la poursuite prévisible de l'abaissement des pentes.

L'analyse de la situation actuelle met en évidence que dans des conditions hydrologiques et d'apport solide équivalentes à celles des 50 dernières années, le retour du transport solide à l'aval du seuil 4 ne peut être envisagé avant un minimum de 50 ans.

La CLE s'est prononcée sur une politique d'aménagement de la basse vallée basée sur un abaissement des seuils du Var et sur un retour à un fonctionnement naturel, tel que décrit par les préconisations du SDAGE. L'objectif est donc que le Var retrouve le fonctionnement naturel d'un fleuve méditerranéen, tout en limitant les risques existants d'inondation.

Nous avons élaboré, sur ces bases, un scénario global d'abaissement des seuils et de réaménagement de la basse vallée

Ce scénario global d'aménagement permet non seulement de diminuer les risques d'inondation des tronçons réengravés, en cours de réengrèvement ou de prévoir l'engrèvement futur de certains tronçons mais également d'accélérer le retour des matériaux à l'aval. Ce scénario global comporte également quelques aménagements chargés de limiter les contraintes sur les ouvrages et les digues en attendant le retour des matériaux.

Nous avons préconisé, dans ce scénario, le phasage des travaux à prévoir, en fonction de l'hydrologie et de l'observation du retour du transport solide pour optimiser la dynamique d'aménagement de la basse vallée.

Ces aménagements concernent principalement l'abaissement successif des seuils 8 à 4 et la suppression des micro-centrales (ou au moins des superstructures) correspondantes au moment où les matériaux atteignent le seuil.

Des interrogations subsistent sur le seuil 10. Son abaissement permettrait de dégager un certain volume de matériaux, limiterait les risques d'inondation dans le bief de la confluence avec l'Estéron au seuil 10 et accélérerait les processus de restauration du fonctionnement naturel aval, mais son impact sur la nappe n'est pas connu à l'heure actuelle. De plus, cet abaissement augmentera la sollicitation au pied du seuil n°16 à long terme.

Parallèlement à l'aménagement de la basse vallée, un suivi régulier des fonds, de la granulométrie et de l'hydrologie dans le cadre d'un observatoire du Var sera nécessaire afin d'estimer au mieux les moments les plus propices à la réalisation de ces aménagements.

Les aménagements à prévoir dans la basse vallée à très court terme sont donc les suivants :

- Suppression de la micro-centrale du seuil 10
- Maintien des seuils 2 et 3 dans leur état 2002
- Construction d'un contre-seuil à l'aval du seuil 4
- Pavage artificiel à l'aval du seuil 16
- Abaissement du seuil 9 et suppression de la micro-centrale
- Abaissement du seuil 1

Postérieurement, la mise en œuvre des actions d'abaissement des seuils avals et des travaux associés devra être déterminée par un suivi régulier du fonctionnement, dans le cadre de « l'observatoire du Var ». Sur la base de ces données, on pourra régulièrement caler la simulation numérique (programme MORMO) et faire des prévisions plus détaillées sur les effets de chaque abaissement de seuil et ainsi mieux définir le moment opportun de cette action.

Cet observatoire intégrera un suivi régulier des fonds, de la granulométrie et de l'hydrologie. Les mesures à effectuer, ainsi que leur fréquence et leur localisation seront précisées.

---

## INTRODUCTION

---

L'étude du fonctionnement physique du lit du fleuve Var dans sa basse vallée a pour principal objectif d'élaborer une stratégie de gestion physique de cette basse vallée compatible avec toutes les orientations du SDAGE RMC et ayant recueilli l'approbation de l'ensemble des acteurs. Cette stratégie de gestion sera alors partie intégrante du futur SAGE « Basse Vallée du Var ».

Cette étude est réalisée en quatre phases :

La première phase de l'étude a consisté en une synthèse de l'ensemble des données existantes, permettant de dégager à partir de l'ensemble des études déjà rédigées les lignes directrices du fonctionnement physique de la vallée alluviale, ainsi que les possibilités d'aménagement et de gestion future de celle-ci.

Nous rappellerons tout d'abord les grandes étapes de cette évolution historique et leur logique, avant d'en préciser les impacts sur l'évolution du lit du Var aussi bien en plan qu'en altitude.

Une attention particulière sera alors portée à l'influence qu'a pu avoir l'activité d'extraction de matériaux sur le comportement de la basse vallée.

La crue forte des 5 et 6 novembre 1994 sera détaillée, ainsi que ses impacts sur les différents ouvrages de contenance et de stabilisation du Var. Le comportement spécifique de l'Estéron, qui a connu une crue majeure, sera précisé.

Les évolutions récentes depuis cet épisode et l'arrêt total des extractions seront détaillées et nous développerons les tendances prévisibles d'évolution qui ont été développées au cours d'études récentes.

Les problématiques particulières des seuils, des protections longitudinales et de la nappe du Var seront ensuite traitées.

La seconde phase de l'étude a consisté à appréhender de la manière la plus fine possible les conditions du retour du transport solide, l'impact de ce retour éventuel et les actions envisageables pour améliorer les conditions du retour du transport solide, l'impact de ce retour éventuel et les actions envisageables pour améliorer les conditions du retour à l'équilibre. Ces calculs ont permis de quantifier les évolutions probables du profil en long en fonction de l'hydraulicité moyenne de la basse vallée du Var, mais aussi d'anticiper sur l'impact d'une crue unique majeure égale ou supérieure à celle de 1994. L'analyse critique préalable du fonctionnement, depuis 1994 et depuis 1998, du comportement du bief seuil 10 – seuil 8 a permis de valider précisément les estimations quantitatives.

La troisième phase de l'étude est la phase principale de l'étude, dans l'optique de l'élaboration du SAGE et de la définition des options générales d'aménagement et de gestion.

Nous développons une stratégie d'aménagement immédiatement opérationnelle compatible au mieux avec les projets présents dans la vallée. Cette stratégie est élaborée par combinaison de scénarios élémentaires dont l'influence sur les conditions de rétablissement du transit sédimentaire sont détaillées.

Cette stratégie permet de développer une vision complète de l'aménagement de la plaine, en tenant compte des impacts aussi bien à long terme que durant les phases transitoires des travaux envisagés, mais aussi en prévoyant un véritable phasage de cet aménagement.

Les trois contraintes majeures que sont :

- la possibilité économique de réaliser les travaux,
- le risque « inondation »,
- la sensibilité tant quantitative que qualitative des nappes

seront prises en compte.

Enfin, la dernière phase d'étude précise les mesures complémentaires à effectuer de manière régulière, de façon à « faire vivre » ces stratégies, et à les adapter en permanence à l'évolution réelle du fonctionnement du lit.

Cette étude a été réalisée en étroite collaboration par :

- Denis Magnan et Julien Vermeulen du bureau d'étude SOGREAH,
- Le docteur Martin Jaeggi, spécialiste en hydraulique et morphologie fluviale
- Messieurs Hunziker et Zarn, du bureau d'étude suisse Hunziker Zarn & Partner

oOo

---

## 1. BILAN DE L'ETAT DES CONNAISSANCES

---

### 1.1 AMENAGEMENT DE LA BASSE VALLEE, HISTORIQUE ET EVOLUTION

#### 1.1.1. JUSQU'AU XVIIEME SIECLE

Zone frontalière entre la France et le comté de Nice, envahie par les marais, la plaine du Var ne s'est peuplée que tardivement (début du XVIIème siècle). Auparavant, elle n'est utilisée que comme zone de parcours pour l'élevage, d'alimentation en bois de feu, et de maraîchage (non protégé).

A cette époque, il n'existe aucun pont pour traverser le fleuve, on ne recense que deux gués : gué de Saint-Laurent et gué de Gattières.

#### 1.1.2. LE DEBUT DU DEVELOPPEMENT DE LA PLAINE

Dès le début du XIX<sup>ème</sup> siècle, il y a une réelle volonté de mise en valeur agricole. En 1845, dans le cadre du plan Sarde, des travaux d'endiguement sont entrepris mais uniquement sur la rive niçoise (rive gauche). Ces endiguements avaient pour but prioritaire de protéger contre les crues du Var les terres nouvellement gagnées, tout en profitant de l'effet fertilisant des crues. A cet effet, l'ensemble de l'aménagement s'est effectué sous forme de casiers submersibles, permettant de piéger sur les terrasses toutes les particules fines (limons fertiles) présentes en suspension. De nombreuses traces de ces aménagements sont encore visibles et structurent la basse vallée (ouvrages de décharges, digues de casiers, ...). L'endiguement de rive gauche sera terminé vers 1930. La rive droite reste à l'état naturel.

La traversée du Var est possible à partir du pont de bois de Saint-Laurent construit en 1792. Le rattachement du Comté de Nice à la France en 1860 s'accompagne de la réalisation d'ouvrages pérennes de traversée du fleuve (Pont Napoléon III, pont de chemin de fer du PLM).

L'endiguement de la rive droite s'effectue entre 1920 et 1970, à des fins agricoles (casiers).

#### 1.1.3. DE L'APRES GUERRE A NOS JOURS

A la fin de la seconde guerre mondiale, l'agriculture est encore majoritaire dans la plaine grâce aux terrains extrêmement fertiles, bien nourris par les crues du Var qui déposent les limons. De plus, la nappe peu profonde fournit une grande quantité d'eau.

La possibilité d'exploiter aisément, de manière industrielle, les gisements alluvionnaires de la basse vallée a entraîné une surexploitation notable de la ressource. Au total ce seront près de 50 millions m<sup>3</sup> de matériaux qui seront extraits en 40 ans représentant 150 ans d'apports naturels.

L'endiguement progressif du Var a eu pour conséquence un léger exhaussement des fonds par dépôt des graviers. Les premières extractions apparaissent donc comme un remède à cet exhaussement. Mais la surexploitation des gravières entraîne petit à petit le basculement du lit et l'abaissement de la nappe.

Cela va conduire à prévoir la réalisation de 16 seuils et à mener à bien l'exécution de 11 d'entre eux. La fonction première des seuils est de maintenir artificiellement la ligne d'eau d'étiage, afin d'éviter que le Var ne draine la nappe. La deuxième fonction est d'empêcher l'effondrement des digues et des ponts, par suite de l'affouillement de leurs fondations. La crête de chaque seuil est fixée au niveau du Var de 1912, tel qu'il avait été levé par le « Service des grandes forces hydrauliques » (administration des « Ponts et Chaussées »). Ces seuils vont redessiner la ligne d'eau du Var en la décomposant en biefs séparés par des chutes de l'ordre de 5 mètres.

Toutefois, les hypothèses hydrologiques retenues pour la construction de ces seuils sont basées sur des séries hydrologiques courtes. On suppose également à l'époque une extraction raisonnée (en largeur et en profondeur) alors que les extractions en souille vont se poursuivre sans réel contrôle entraînant le piégeage de tous les matériaux (grossiers à l'amont et limons dans les souilles). Dans les souilles s'est créé un milieu nouveau, où le limon a pris la place du gravier absent. La pente de l'écoulement au niveau des souilles est faible voire nulle en temps ordinaire.

Le dépôt des limons entre les seuils va entraîner le développement d'une végétation rivulaire exubérante et exogène. Cette végétation va piéger encore plus de limon dans un cycle qui s'auto-alimente. La zone comprise entre les seuils 10 et 2, bien que constituant un milieu totalement artificiel, va être classée en zone de réserve ornithologique. Si ce développement améliore la qualité du milieu, il diminue la capacité d'écoulement des crues.

Pour répondre aux besoins de consommation électrique locale, les seuils ont été aménagés pour l'hydroélectricité postérieurement à leur construction. Si l'impact économique est positif, les effets sur les lignes d'eau et sur le charriage des matériaux sont très pénalisants, les seuils n'étant pas conçus au départ pour cette fonction. De plus les micro-centrales ont été installées au tiers de la largeur du lit et se sont accompagnées de la construction de routes d'accès. En plus de l'élévation des niveaux en crue, l'hétérogénéité des courants sur le seuil a favorisé l'érosion des radiers.

Dans les 3 derniers kilomètres du cours du Var, l'endiguement se poursuit avec le développement de Saint-Laurent, la construction de l'autoroute A8 ou même des remblais sauvages. Cette restriction sera particulièrement dommageable car la pente du Var étant plus faible qu'en amont, l'écoulement moins rapide exige des sections plus grandes.

La largeur d'écoulement disponible pour le fleuve s'est ainsi réduite pour se fixer à une largeur moyenne de 300 mètres entre digues voire moins en certains points localisés sur l'ensemble de la basse vallée. La surface dévolue à la rivière a diminué de 58 % ( de 15.25 km<sup>2</sup> à 6.25 km<sup>2</sup> ) entre 1800 et 1997, entre le Gabre et la Mer.

Avec la crue majeure de 1994 (débit estimé à 3000 m<sup>3</sup>/s) le Var rappelle qu'il a besoin d'un espace minimum pour évoluer :

- Rupture du seuil 2 puis du seuil 3 avec déstabilisation du seuil 4, mettant en évidence le risque de rupture des seuils « en château de carte ».
- Le mauvais calage de la digue de l'autoroute A8 (digue Escota) en rive gauche a provoqué une importante submersion sur Nice, jusqu'à l'aéroport et la préfecture.
- En rive droite au niveau du Pont Napoléon III, la limite de débordement était presque atteinte, menaçant le centre commercial CAP 3000.

- En amont des seuils 9 et 10, on assiste à la submersion de la zone industrielle de Carros-Le Broc, dû à un mauvais calage de la digue existante, faisant suite à un arasement des digues, effectué dans les années 1980

Aujourd'hui, l'ensemble des projets s'articule autour du développement industriel de la plaine et de son urbanisation, sans oublier le souci de préservation de la nappe.

## **1.2. EVOLUTION DU LIT EN PLAN ET EN ALTITUDE AVANT 1994**

### **1.2.1. EVOLUTION DU LIT EN PLAN**

#### **1.2.1.1. ENDIGUEMENT**

Jusqu'à la deuxième moitié du 19<sup>ème</sup> siècle, le Var divaguait librement dans sa vallée. L'endiguement fut réalisé par étapes :

- Digue rive gauche de Baus Rous jusqu'en aval du pont actuel de la Manda de 1844 à 1851 (digue des Sardes).
- Prolongation de cette digue rive gauche jusqu'à l'embouchure de 1861 à 1865 (digue des Français).
- La construction de la digue rive droite a été plus étalée dans le temps :
  - Avant 1908, digue à la Madelaine en amont et digue entre le pont de la Manda et Saint-Laurent du Var,
  - Après 1940, achèvement de la digue à Saint-Laurent du Var de 1940 à 1957 et de l'Estéron au pont de la Manda de 1963 à 1974.

L'endiguement avait d'abord pour but le développement de l'agriculture en offrant de nouvelles terres et en permettant le dépôt des limons (casiers). La largeur de divagation du Var était limitée alors à 300 mètres environ dans la plaine.

La restriction de largeur a ensuite été accentuée en certains points localisés (développement de la ville de Saint-Laurent, péage de l'autoroute A8 au niveau de Saint-Isidore).

La superposition de la carte de Cassini et des endiguements de 1920 et 1998 montre clairement cette restriction de largeur du lit du fleuve.

L'endiguement seul a eu sur l'évolution du lit deux effets contradictoires :

- La concentration des écoulements en crue a augmenté la capacité de charriage. Cet effet a probablement contribué à accroître les dépôts à l'embouchure au cours de la première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle.
- A l'inverse, la surface de dépôt a été fortement diminuée, ce qui a conduit à accroître la vitesse d'élévation du lit.



### 1.2.1.2. BOISEMENT ET FERMETURE DU LIT

Après la construction des seuils et la formation des profondes souilles d'extraction, les limons fertiles se sont déposés. La végétation colonisant ces zones enlimonées, d'abord pauvres, a ralenti l'écoulement des eaux favorisant ainsi le dépôt des limons. Les bancs végétalisés se sont donc exondés au fur et à mesure et la végétation s'est développée avec l'apparition d'arbustes puis d'arbres. Les crues, même fortes, n'ont plus été alors capables d'arracher la végétation.

Ce phénomène favorise la formation d'un chenal figé à l'étiage et augmente sensiblement les niveaux en crue.



*Photo aérienne de la zone des seuils en 1984 – Végétalisation des berges et des îlots*

### 1.2.2. EVOLUTION DU LIT EN ALTITUDE

Le profil IGN de 1912, correspond à une situation encore très naturelle de la morphologie du Var, la digue de rive gauche n'étant alors que peu développée et très récente (1908).

Le Var était alors en exhaussement dans la basse vallée. La remontée de la ligne d'eau à l'embouchure ralentissant les vitesses, les matériaux transportés se déposent dans la vallée. Mais la largeur de divagation offerte au fleuve (plus de 500 mètres) laisse à penser que cet

exhaussement était très lent (on estime à environ 0,70 m l'exhaussement sur un siècle mais aucun document ne permet de confirmer ce chiffre).

L'endiguement progressif au cours du 20<sup>ème</sup> siècle a donc eu pour principal effet de diminuer la surface offerte au dépôt de matériaux, accélérant ainsi l'exhaussement. Ce dernier a été plus sensible à l'aval car l'endiguement a également eu pour effet d'augmenter les vitesses et donc la capacité de charriage du Var. Les dépôts à l'aval ont donc été plus importants.

Les premières exploitations de gravières répondaient donc au besoin de curage, notamment à l'aval de Saint-Isidore.

Après la seconde guerre mondiale, les extractions ont été beaucoup plus importantes que les apports naturels du Var entraînant l'enfoncement du lit, observé dès 1960.

La construction des seuils et les extractions importantes dans les biefs ainsi formé ont profondément modifié le profil en long du Var. L'arrêt du transport solide a entraîné le dépôt des limons et donc une ligne d'eau quasi horizontale. Des chutes d'environ 5 m à l'étiage se sont alors formées à l'aval des seuils.

### **1.3. L'IMPACT DE LA CRUE DE 1994**

Cet événement constitue la crue majeure du 20<sup>ème</sup> siècle, avec des débits de l'ordre de 3000 m<sup>3</sup>/s, dépassant très largement la crue centennale estimée à l'époque à 2000 m<sup>3</sup>/s. Désormais la crue centennale de référence a été réévaluée à 3500 m<sup>3</sup>/s grâce aux travaux conjoints de SOGREAH et du CEMAGREF.

La conséquence majeure de cette crue dans la basse vallée a été une large inondation en rive gauche du Var, à partir du point bas créé dans la digue lors de la construction de l'autoroute A8, l'inondation s'étendant de ce point jusqu'à l'aéroport. De légers débordements ont également été constatés, notamment en rive droite, sur la zone industrielle de Carros.

La crue de 1994 a également été à l'origine de la rupture des seuils 2 puis 3. La ruine de ces deux seuils a eu pour conséquences dans le tronçon entre le seuil 4 et l'embouchure :

- Un abaissement brutal des lignes d'eau
- La déstabilisation du seuil 4, mettant en évidence le risque de rupture « en château de carte » des seuils.

La crue s'est accompagnée d'un fort transport sur le seuil 10 et d'un remblaiement partiel de la tête de souille entre les seuils 10 et 9.

Des affouillements localisés ont été constatés :

- Sur la voie des carriers à l'aval des seuils
- Sur la voie des Chemins de fer de Provence à l'amont
- Sur la RN202 à l'amont

Avant 1994, L'Estéron ne participait que faiblement à l'alimentation solide du Var. L'hydraulicité importante des années allant de 1991 à 1994 et surtout celle de la crue de novembre 1994 a conduit à une érosion régressive d'une ampleur sans précédent sur ce cours d'eau.

Le déficit d'apport sédimentaire passant par-dessus le seuil 16 a entraîné une érosion régressive depuis la confluence avec l'Estéron jusqu'au seuil 16, mettant en péril cet ouvrage qui est le dernier rempart contre la ruine du pont Charles-Albert.

## **1.4. L'EVOLUTION RECENTE**

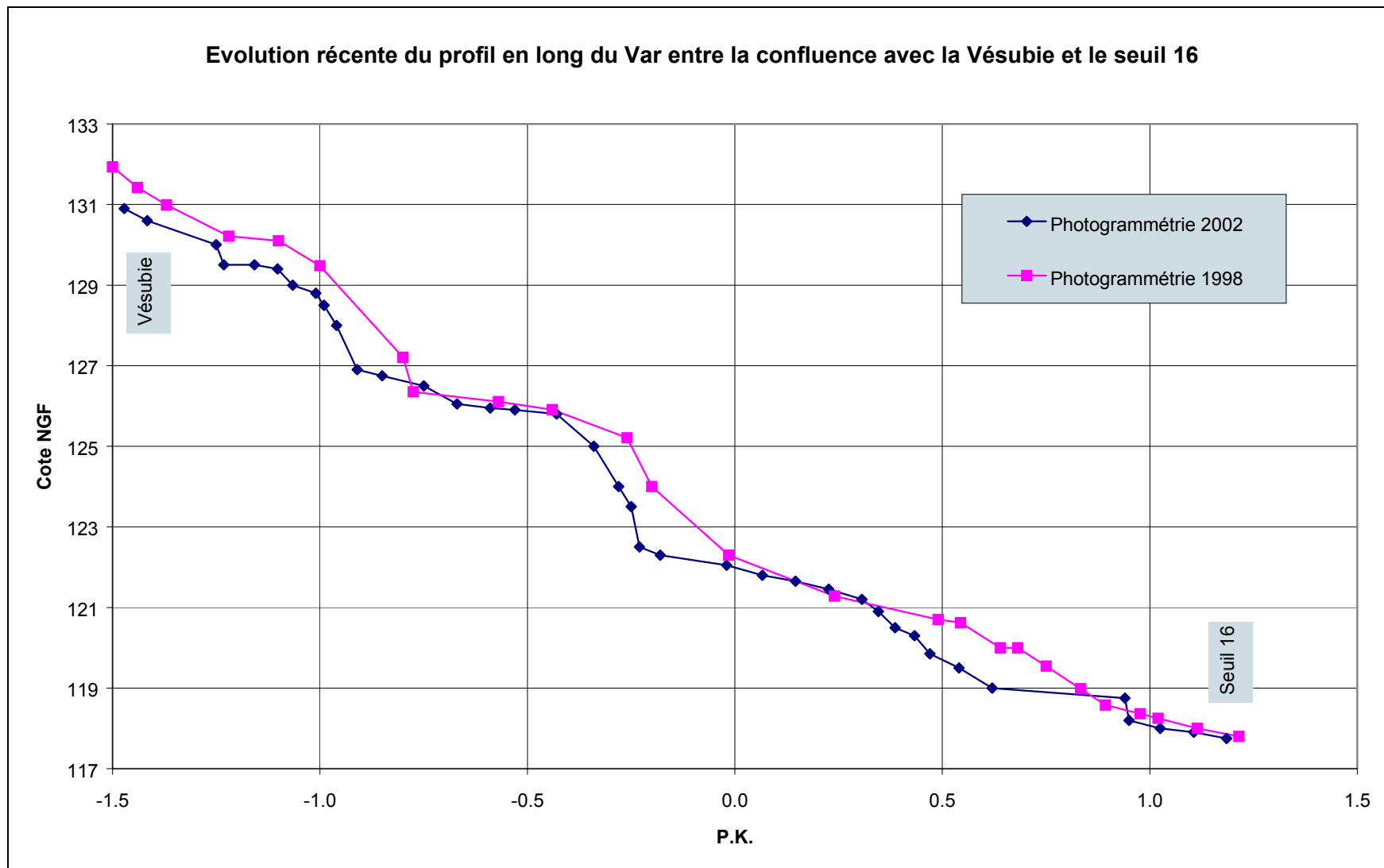
L'ensemble de la base vallée du Var, en aval du Plan du Var, présente un système sédimentaire déficitaire. Il en résulte un déséquilibre morphologique marqué. Ce déséquilibre a des conséquences diverses suivant les tronçons. La suite de ce paragraphe analyse l'évolution du lit, pour chaque tronçon, par comparaison des profils en long de 1998 et de 2001.

La comparaison des deux profils en long est donnée à la fin du paragraphe.

### **1.4.1. DE LA CONFLUENCE AVEC LA VESUBIE AU SEUIL 16**

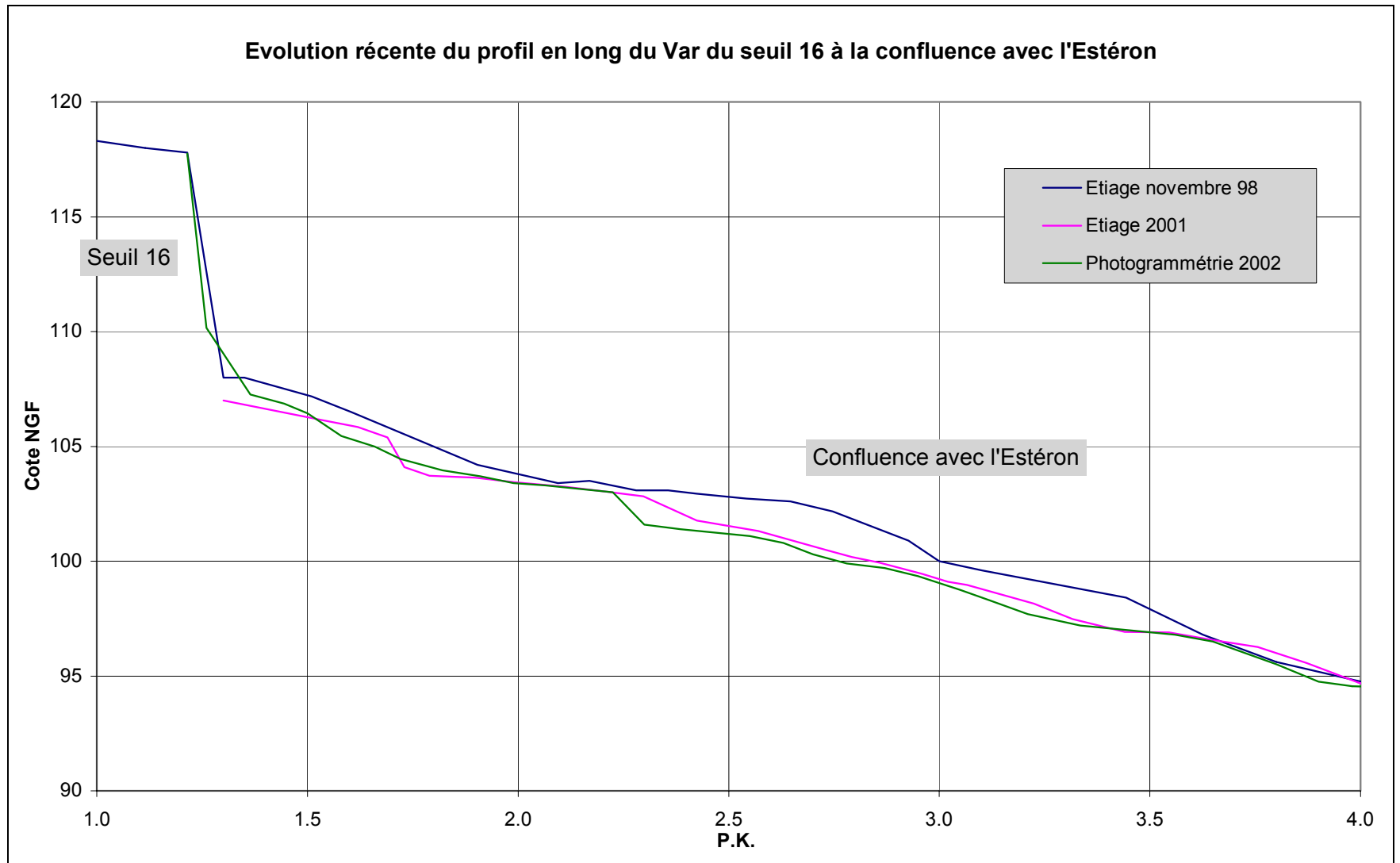
Les apports solides de la Vésubie limitent l'abaissement du lit. Mais le transport solide n'a toujours pas retrouvé dans ce tronçon son « activité naturelle ».

Une comparaison des profils en long issus des photogrammétriques de 1998 et de 2002 montre un enfoncement du lit quasiment généralisé de l'ordre de 1 mètre, le niveau aval étant fixé par le seuil 16.



#### **1.4.2. DU SEUIL 16 A L'ESTERON**

Le tronçon du seuil 16 à la confluence s'est fortement enfoncé. La baisse du niveau est générale entre le seuil 16 et le PK 3.6 en aval immédiat de la confluence du Var et de l'Estéron. Elle est de 1 m au pied du seuil 16, mais dépasse cette valeur au confluent. Les apports solides importants de l'Estéron lors de la crue de 1994 ont été partiellement repris par les crues récentes, conduisant au lissage du profil en long. L'abaissement du lit devrait donc se poursuivre, aggravant la menace de ruine du seuil 16 et du pont Charles-Albert.

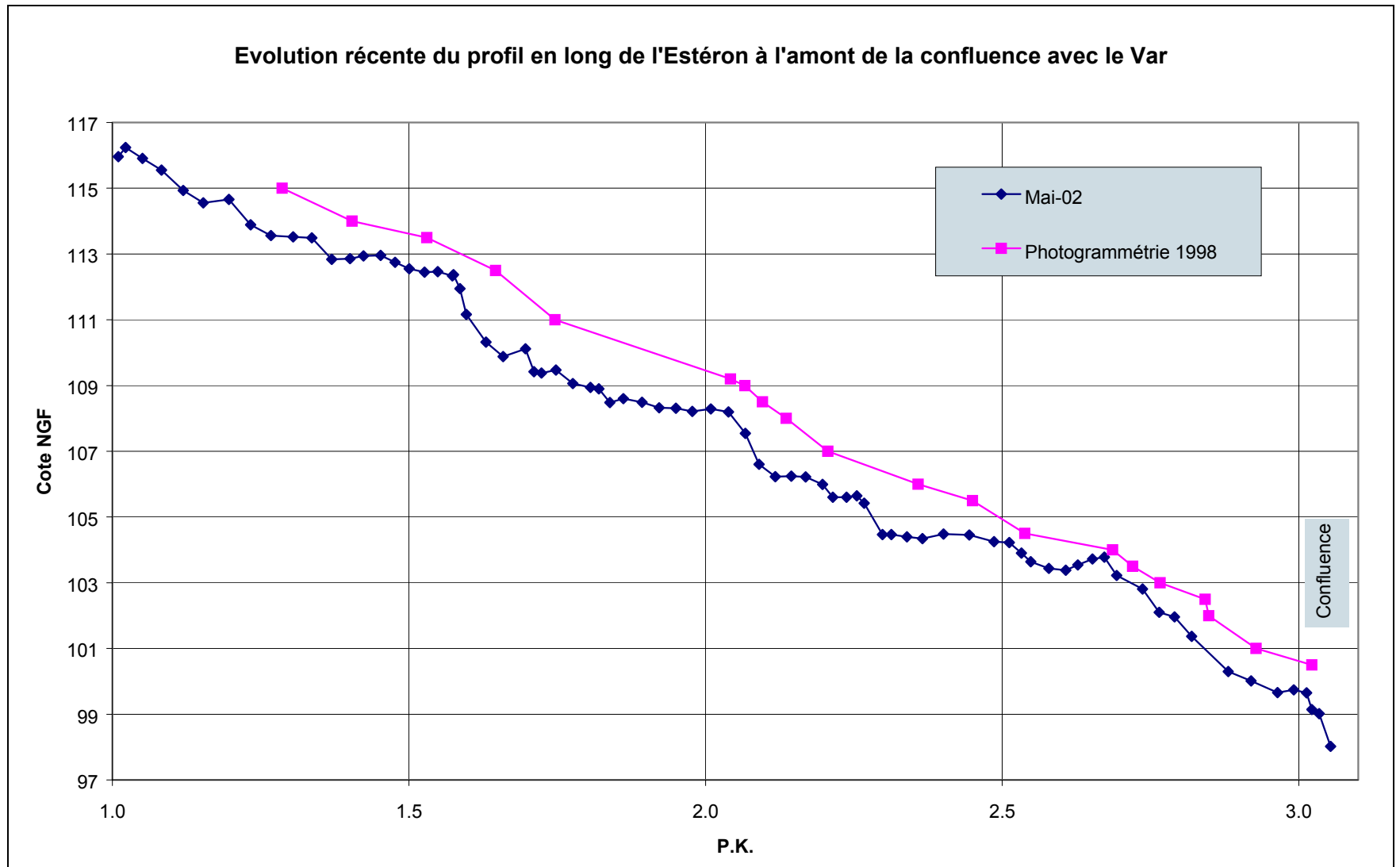


### 1.4.3. L'ESTERON

L'enfoncement du lit par érosion régressive est très important. Le profil en long relevé en mai 2002 montre un abaissement généralisé des fonds de 0.5 m à 1 m par rapport à la photogrammétrie de 1998 sur un linéaire de près de 2km.



*Berge rive droite de l'Estéron à l'amont de la confluence, le 20 mars 2001*



#### **1.4.4. DE L'ESTERON AU TORRENT DE SAINT-BLAISE**

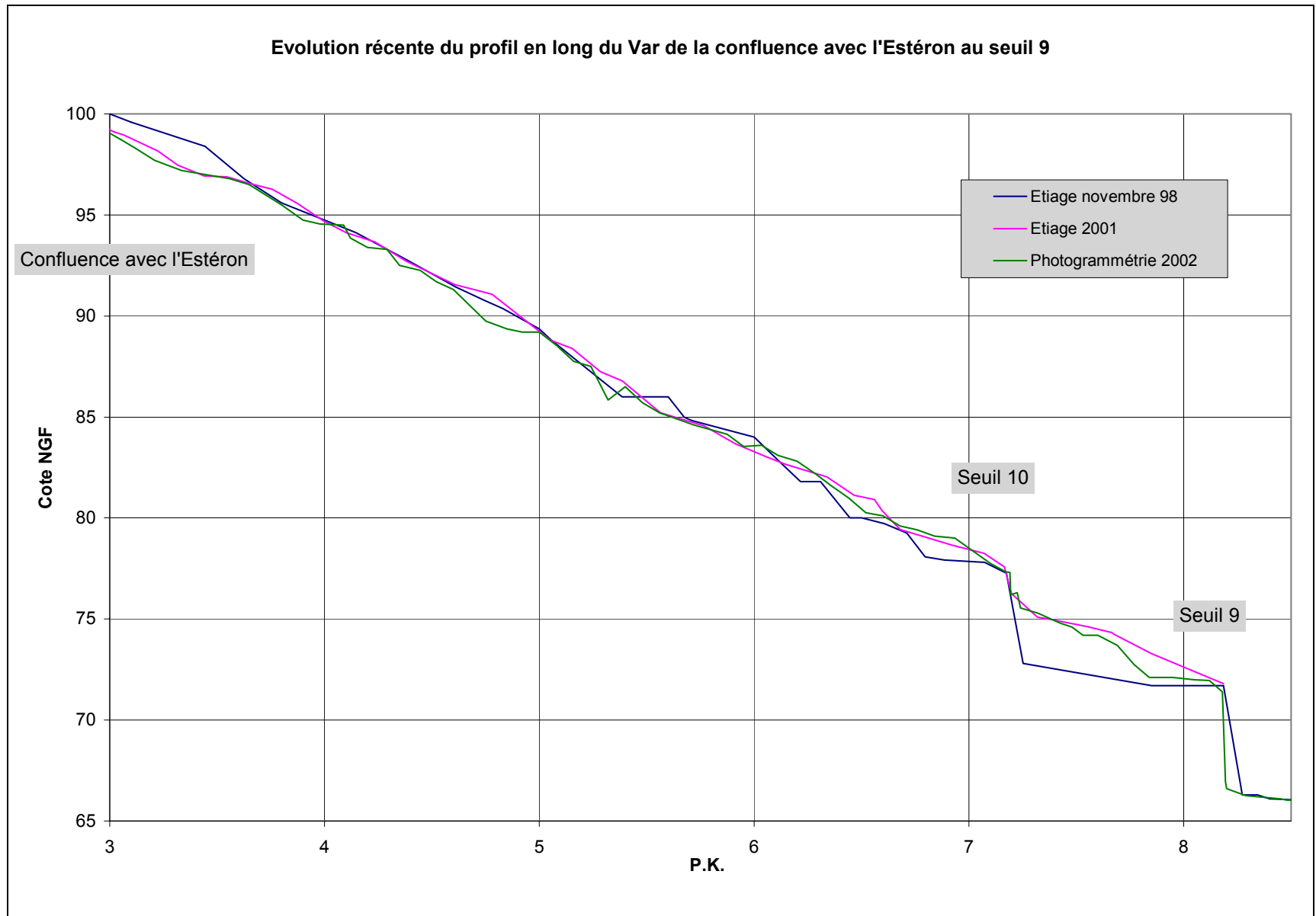
De l'Estéron au torrent de Saint-Blaise, la stabilité du lit est remarquable, bien que temporaire, cette dernière résultant des apports solides de l'Estéron lors de la crue de 1994, qui repris régulièrement, assurent la continuité du transit sédimentaire. Les formes développées par le lit de la rivière sont ici caractéristiques des rivières à fort transport solide, avec un tressage actif important.

#### **1.4.5. DU TORRENT DE SAINT-BLAISE AU SEUIL 10**

Du torrent de Saint Blaise au seuil 10, on constate une tendance à l'exhaussement en moyenne de 0.5 m. Cette situation provient aussi de l'arrêt du désengravement par dragage qui était effectué afin de permettre un bon fonctionnement de la micro centrale du seuil 10, cette unité de production électrique étant désormais inutilisable.

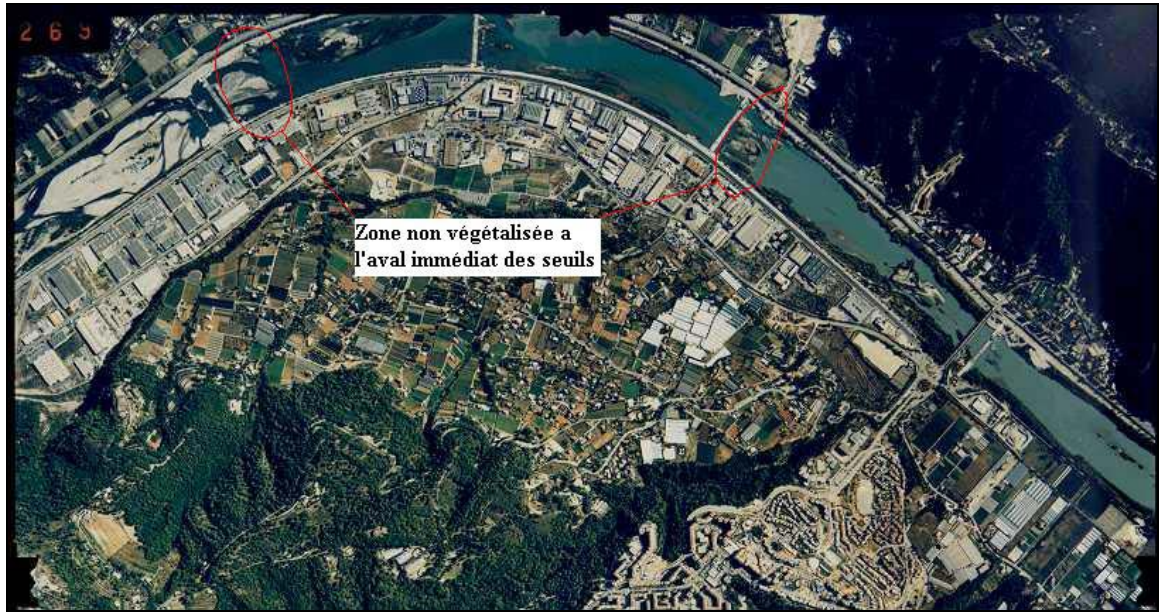
#### **1.4.6. DU SEUIL 10 AU SEUIL 9**

Sur ce tronçon, le retour du transport solide naturel conduit au retour à la morphologie naturelle de la rivière (tressage actif). On assiste à un balayage de l'ensemble du chenal endigué, avec reprise et/ou nettoyage des terrasses limoneuses, mêmes boisées. Le dépôt des graviers induit un exhaussement sensible du lit du Var. L'exhaussement dépasse 3 mètres au pied du seuil 10 par rapport à la situation antérieure à la crue de novembre 1994.

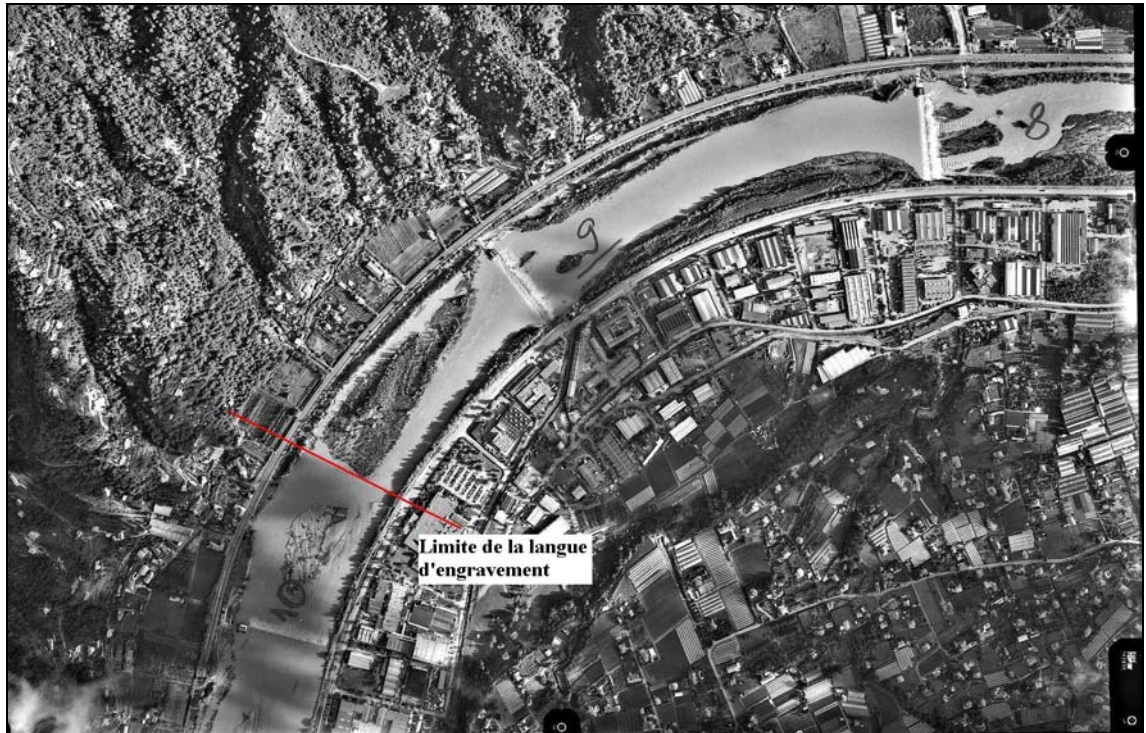


Le front de réengrèvement a progressé d'environ 200 mètres entre 1994 et 1998. En 1999, la transition entre le lit engravé et le lit enlimoné se trouvait environ 600 mètres en aval du seuil 10.

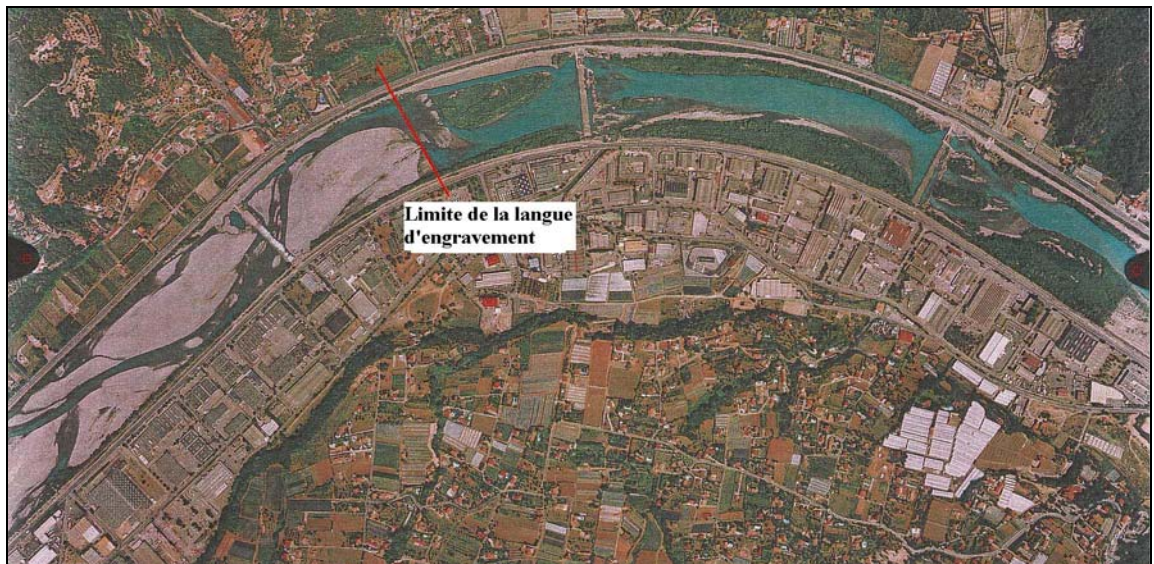
L'évolution de la langue de matériaux au cours du temps est bien visible sur les photos aériennes :



- Photo aérienne de 1984 : à l'amont du seuil 10, le Var présente les caractéristiques d'une rivière torrentielle avec lit en tresses, méandrement, absence de végétation. A l'aval du seuil 10, le transport solide n'est pas rétabli, un chenal profond est figé dans le lit en rive droite. En rive gauche, un banc est fortement végétalisé et enlimoné. Sur 150 mètres à l'aval du seuil 10, le substrat alluvionnaire est encore présent, notamment du fait des vitesses importantes à l'aval immédiat du seuil qui empêchent tout dépôt de limon. On retrouve ce phénomène à l'aval du seuil 8. Ces petits tronçons, non colmatés, sont ceux où s'effectue l'équilibre nappe-rivière.



- Photo aérienne de 1994, juste après la crue majeure de novembre : Le débit est encore important mais on note dans le bief entre les seuils 9 et 10 la présence d'une végétation importante au bord des berges et sur le banc en rive gauche. Le front de réengrèvement se trouve 400 m environ à l'aval du seuil 10. La crue de 1994 a fortement contribué au retour du transport sur le seuil 10.



- Photo aérienne de 1998, à l'amont du front de réengrèvement, la végétation a disparu et le lit retrouve une morphologie naturelle. Le front se trouve environ 600 m à l'aval du seuil 10.



- Octobre 2002, seuil 10. Le bief entre le seuil 9 et 10 est quasiment totalement engravé. La chute sur le seuil 10 est très faible de 0.50 m environ.

#### 1.4.7. DU SEUIL 9 AU SEUIL 8

L'hydrologie importante de la fin d'année 2002 a permis à la langue de matériaux de progresser dans ce bief. D'après les exploitants des micro-centrales, quelques graviers passent même le seuil 8. Toutefois le bief n'a pas encore retrouvé sa pente d'équilibre naturelle.

---

## 2. ETUDE DU RETOUR DU TRANSPORT SOLIDE

---

### 2.1. LES DONNEES DE BASE

L'analyse des conditions du retour du transport solide constituera le socle de l'élaboration ultérieure d'une stratégie d'aménagement. Elle doit donc s'appuyer sur les données de base très précises qui sont :

- topographique,
- hydrologique,
- granulométrique.

#### 2.1.1. LES DONNEES TOPOGRAPHIQUES

Notre étude s'est appuyée sur les données suivantes :

- principalement la restitution photographique au 1/2000 de l'ensemble de la basse vallée réalisée par le SMEBVV au cours du printemps 2002,
- la restitution photogramétrique au 1/2000 de 1998, qui a servi de base de comparaison,
- les différents profils en long représentatifs de l'étiage du Var ou de l'étude :
  - profil en long 2002 de l'Esteron levé pour la présente étude,
  - profil en long d'étiage du Var levé :
    - en 2001 pour la DDE 06,
    - en 1991 pour la DDE 06,
    - en 1912 pour le suivi des grandes forces hydrauliques.
- Les cahiers de profils en travers du lit du Var existant : Ces profils, notamment ceux réalisés en 1995 après la grande crue de novembre 1994, permettent d'appréhender les conditions de remplissage des fossés d'érosion.

L'analyse de ces différents éléments topographiques a permis d'établir les pentes représentatives du transport solide dans les différents biefs, dans l'état actuel, ainsi qu'en 1912, profil en long considéré comme représentatif de l'état naturel.

Bief	Pente 1912 (‰)	Pente 2002 (‰)
Mer-seuil 2	4.4	3.4
Seuil 2-seuil 4	4.5	4.0
Seuil 4-seuil 9	4.9	
Seuil 9-seuil 10	5.8	
Seuil 10-Estéron	6.9	5.2
Estéron-seuil 16	7.0	5.0
Seuil 16-Vésubie	5.6	4.9
Estéron aval	7.9	8.1
Vésubie aval	12.0	

## 2.1.2. HYDROLOGIE

Les données hydrologiques disponibles sur la basse vallée du Var sont caractérisées par leur faible quantité. En effet, les séries de débit mesurées et disponibles sont disparates et de durée relativement courte.

Lors de l'étude globale de 1998, nous n'avons à notre disposition que les séries disponibles auprès de la banque hydro, aux stations DIREN. Sur la base de ces données, dont les séries sont courtes, nous avons extrait des courbes de débit classé caractéristiques de chacun des affluents pour étudier les apports moyens.

Le SMEBVV nous a fournis pour la présente étude des éléments complémentaires, et notamment la chronique complète des débits moyens journaliers enregistrés à la Mescla entre 1948 et 1984.

Les éléments concernant les débits moyens journaliers en notre possession sont donc :

- la chronique 1948-1984 à la Mescla,
- la chronique 1993-1995 à la Mescla,
- la chronique 1975-1977 au pont de la Manda,
- la chronique 1985-2000 au pont Napoléon III
- la chronique 1993-1997 à la Clave (Estéron) avec des lacunes.

Notre première tâche a consisté à vérifier si des corrélations existaient sur les périodes communes, entre les données de la Mescla, la Manda, Napoléon III et la Clave.

De cette analyse, nous avons pu tirer les relations suivantes :

- $Q_{\text{mescla}} = Q_{\text{manda}} * 0.85$  d'avril à septembre
- $Q_{\text{mescla}} = Q_{\text{manda}} * 0.65$  d'octobre à mars
- $Q_{\text{estéron}} = Q_{\text{manda}} * 0.10$  d'avril à septembre
- $Q_{\text{estéron}} = Q_{\text{manda}} * 0.20$  d'octobre à mars

Ces relations nous ont permis de reconstituer trois séries fictives de chronique des débits moyens journaliers de 1948 à 2000 aux points suivants :

- la Clave,
- Plan du Var,
- La Manda.

Les hydrogrammes des dernières crues importantes (1993, 1994, 1997) sont connus à Nice et à la Clave. Ils ont permis d'établir la forme d'un hydrogramme type en ces trois points du bassin versant.

Afin de tenir compte de l'effet très sensible des fortes crues sur le transport solide, nous avons intégré ces hydrogrammes aux chroniques des débits reconstitués, en faisant varier les pas de temps, dès que les débits moyens journaliers à Nice étaient supérieurs à  $Q_{jm} 800 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Ceci nous a permis d'établir une chronique « réaliste » de l'hydrologie du Var et de l'Esteron dans la basse vallée du var sur une période de 53 ans.

D'autre part, nous avons pu reconstituer les courbes des débits classés aux différents points caractéristiques.

La comparaison de ces courbes avec celles établies en 1998 montre que la prise en compte de la chronique longue des débits de la Mescla entraîne un léger abaissement de la valeur des débits. En chacun des points, les courbes sont très proches mais les débits moyens de fréquence rare sont légèrement plus faibles que ceux qui avaient été pris en compte en 1998. Cette atténuation des courbes de débits classés pourrait avoir une influence sur la valeur du volume moyen susceptible d'être transportés sur une année.

### **2.1.3. GRANULOMETRIE**

La connaissance des caractéristiques géométriques des matériaux du lit susceptibles d'être transportés par charriage aux différents points de la basse vallée est indispensable à la quantification du transport.

Depuis plus de 30 ans, c'est la granulométrie Pradon qui est utilisée pour décrire les matériaux du fond du lit du Var dans la basse vallée. Cette granulométrie dans la masse, réalisée avant la construction des seuils, était homogène sur l'ensemble des 22 km depuis Plan du Var à la mer.

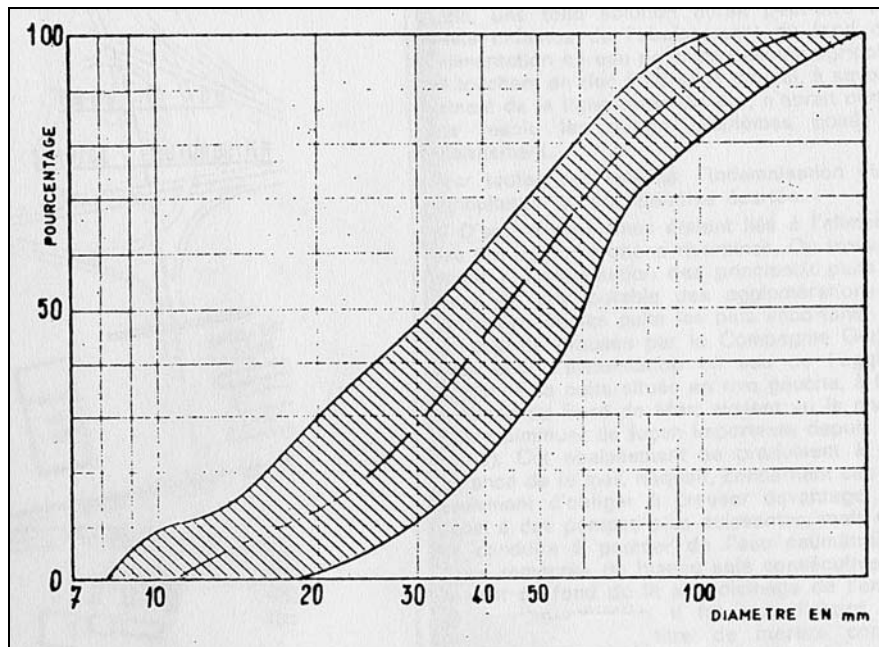
Aujourd'hui, les apports solides depuis l'amont de la basse vallée sont très faibles la granulométrie Pradon n'est donc probablement plus représentative des fonds de l'ensemble de la basse vallée. Il convient aujourd'hui de préciser les caractéristiques des matériaux de la basse vallée dans l'état actuel.

#### **2.1.3.1. GRANULOMETRIE PRADON**

En 1972, C. Pradon, ingénieur des Ponts et Chaussées, a publié dans un article (« Les travaux d'aménagements du Var inférieur » Travaux - Mai 1972) la granulométrie moyenne du fond du lit du Var dans la basse vallée. Cette granulométrie dans la masse, réalisée avant la construction des seuils, était à l'époque bien représentative des matériaux du fleuve depuis Plan du Var jusqu'à la mer.

La granulométrie Pradon était caractérisée par un fuseau, dont la courbe était :

Granulométrie Pradon		
$d_{30}$	$d_{50}$	$d_{90}$
31 mm	44 mm	95 mm



Fuseau Pradon

Depuis 1972, aucune autre mesure de fuseau granulométrique n'avait été réalisée, à notre connaissance.

### 2.1.3.2. GRANULOMETRIE 2002

L'objectif des mesures granulométriques effectuées est de connaître la granulométrie réelle, en 2002, en différents points caractéristiques de la basse vallée.

#### 2.1.3.2.1. MESURES EFFECTUEES

Deux types de mesures ont été effectuées pour déterminer la granulométrie :

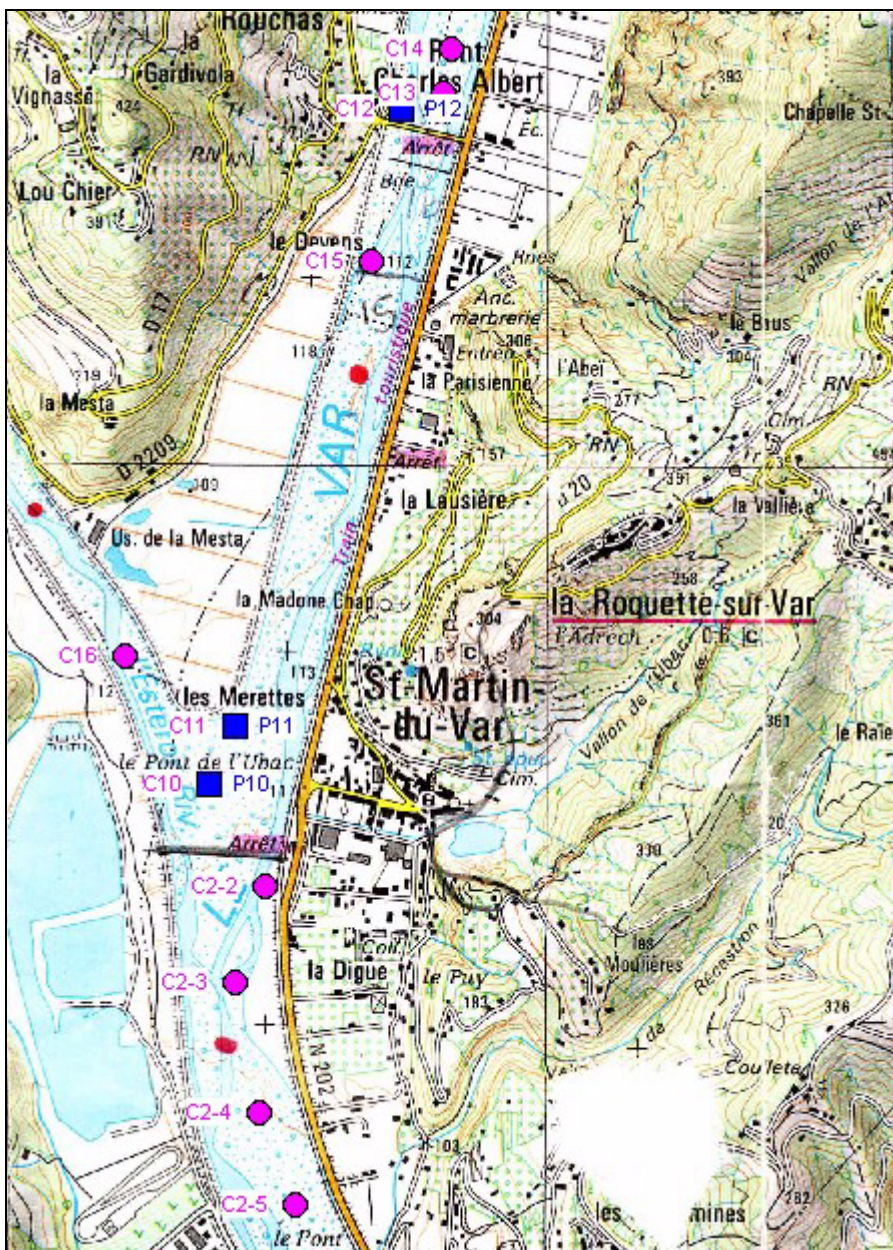
- Prélèvements granulométriques dans la masse : prise d'échantillons de 100 kg à 200 kg à 1 m de profondeur puis tamisage suivant la norme NF P18 560 (septembre 1990)
- Comptages linéaires de surface : mesure des dimensions des matériaux de surface tous les 50 cm sur 20 m

Les prélèvements granulométriques ont été réalisés les 15 et 16 avril 2002, dans le fond du lit depuis les berges ou directement sur des bancs au milieu du fleuve.

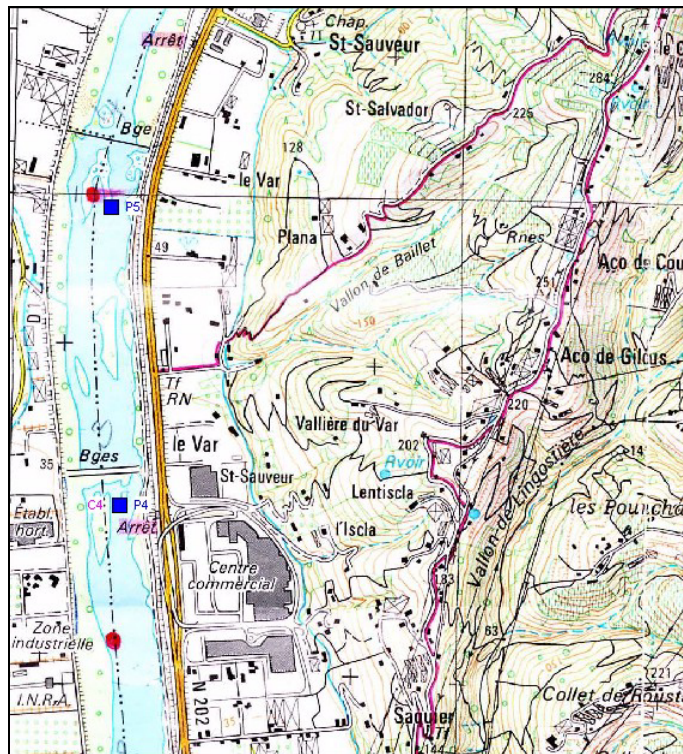
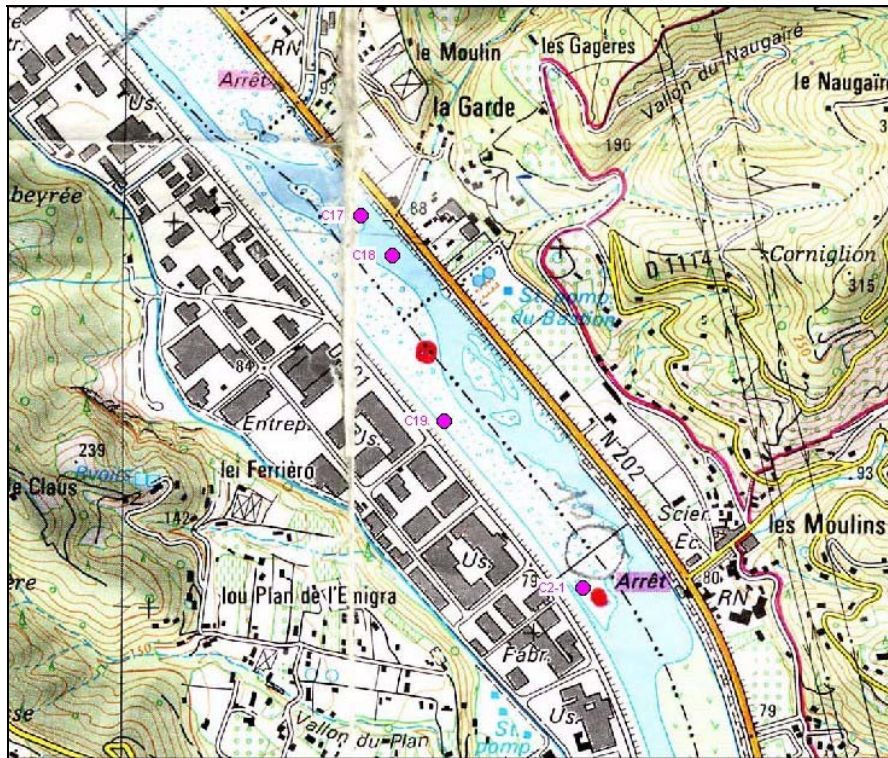
Les comptages linéaires, au nombre de 35, ont été réalisés les 15, 16, 22, 23 avril 2002 et 12 juin 2002 sur des bancs au milieu du Var. Des comptages linéaires ont été systématiquement réalisés aux endroits des prélèvements en masse, afin d'établir des corrélations permettant de valoriser l'ensemble des autres comptages.

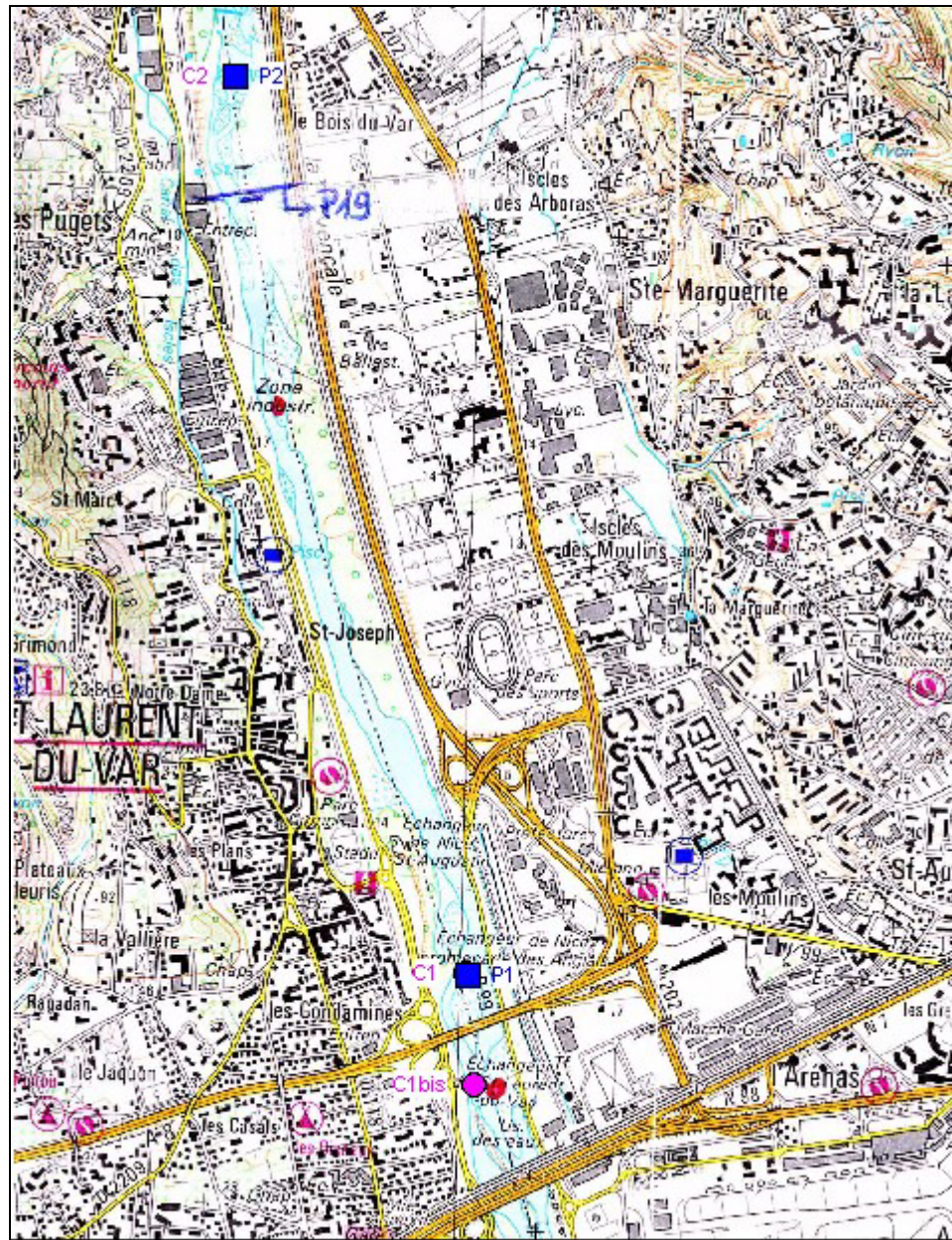
Les cartes ci-après donnent la position des différents comptages et prélèvements réalisés.

SMEBVV (SYNDICAT MIXTE D'ETUDES DE LA BASSE VALLEE DU VAR)  
ETUDE DU FONCTIONNEMENT PHYSIQUE DU LIT DU FLEUVE VAR  
RAPPORT



SMEBVV (SYNDICAT MIXTE D'ETUDES DE LA BASSE VALLEE DU VAR)  
ETUDE DU FONCTIONNEMENT PHYSIQUE DU LIT DU FLEUVE VAR  
RAPPORT



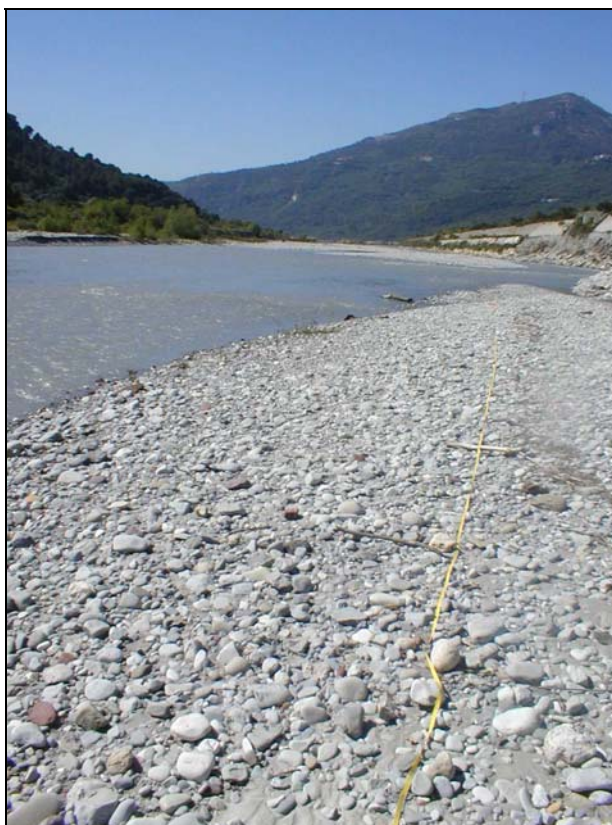




*Prélèvements granulométriques dans la masse*



*Prélèvements de matériaux à 1 m de profondeur environ*



*Comptage linéaire*

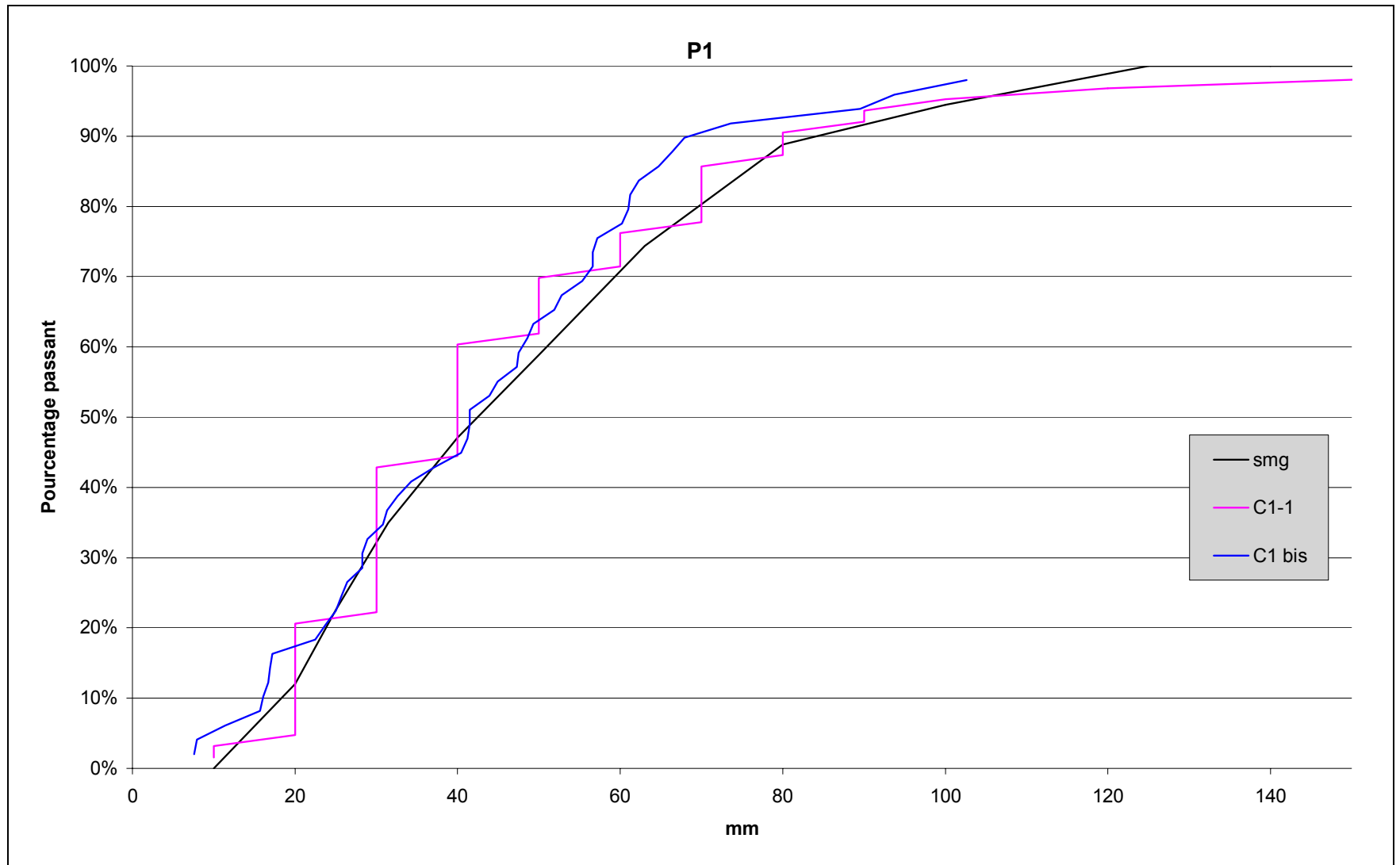
#### 2.1.3.2.2. **CORRELATION ENTRE LES DIFFERENTS MODES DE PRELEVEMENT**

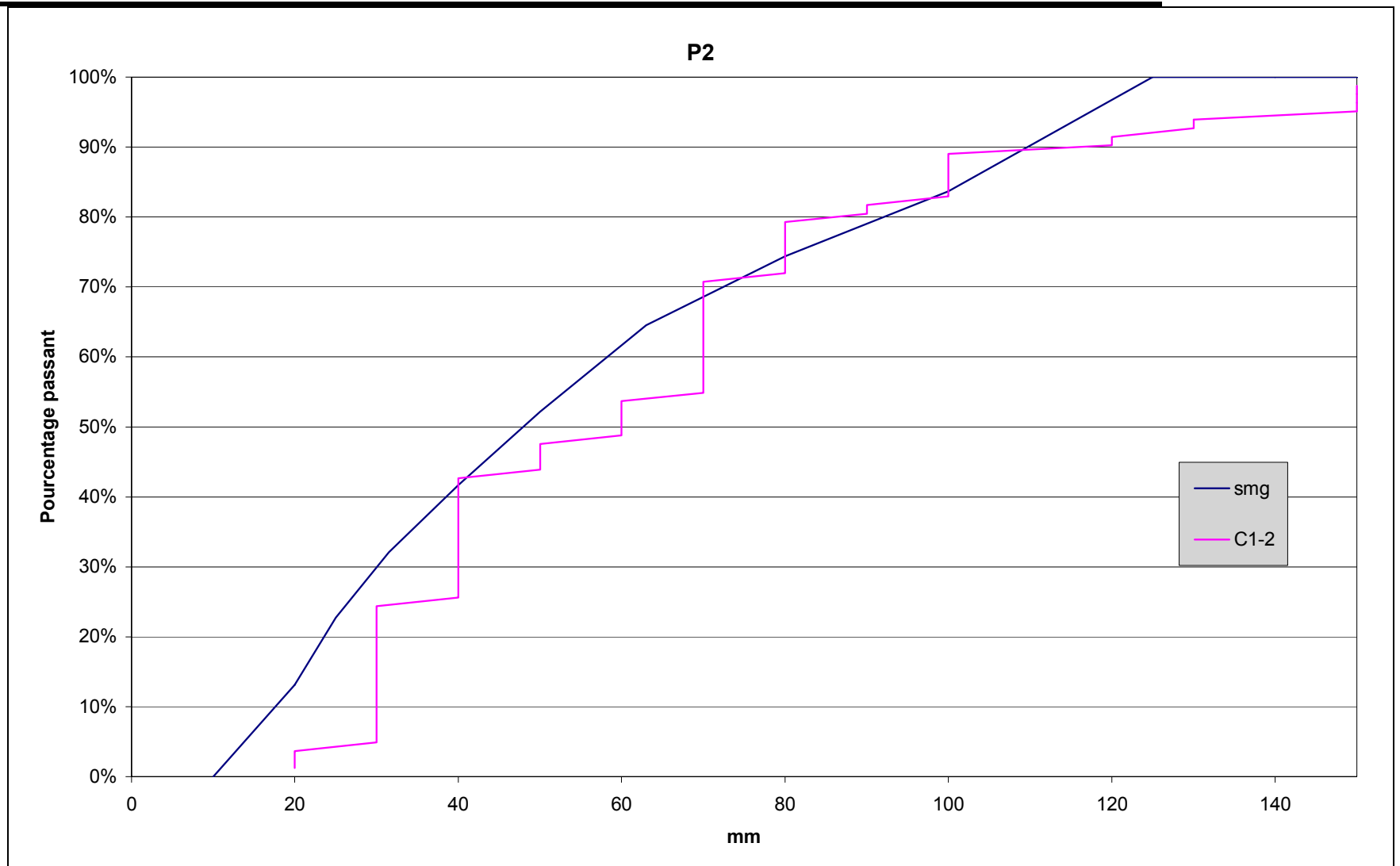
Afin de s'assurer de la validité de la méthode de comptage, nous avons systématiquement réalisé des relevés par comptage aux points de prélèvement en masse. Nous avons ensuite comparé les résultats obtenus par les deux méthodes d'analyse (courbes jointes, les prélèvements correspondent aux courbes « SMG », les comptages linéaires correspondent aux courbes « C\* »).

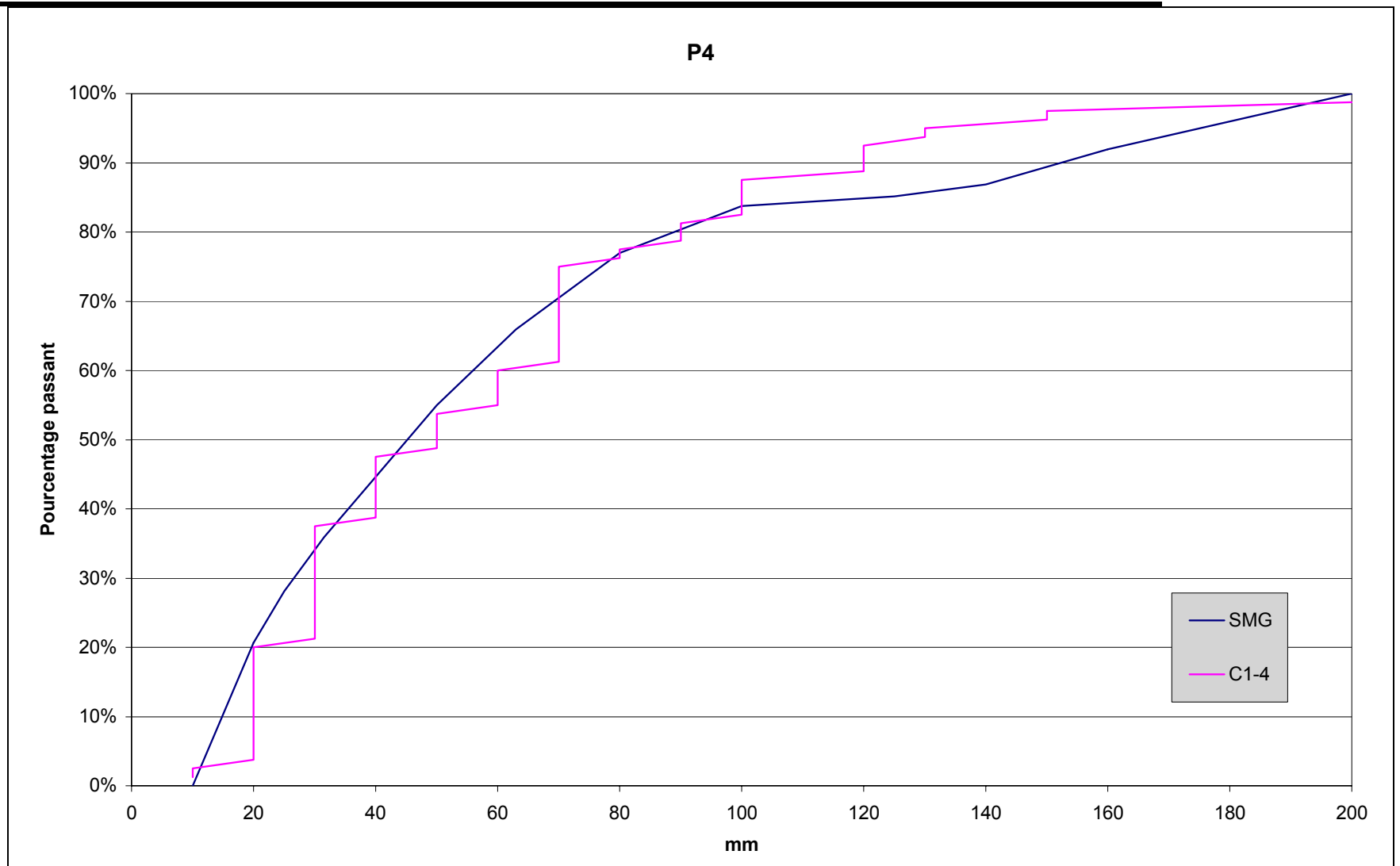
Les comparaisons apparaissent bonnes aux points de prélèvements P1, P2, P4, P11 et P12 et moyennes au point P10 à la confluence avec l'Estéron.

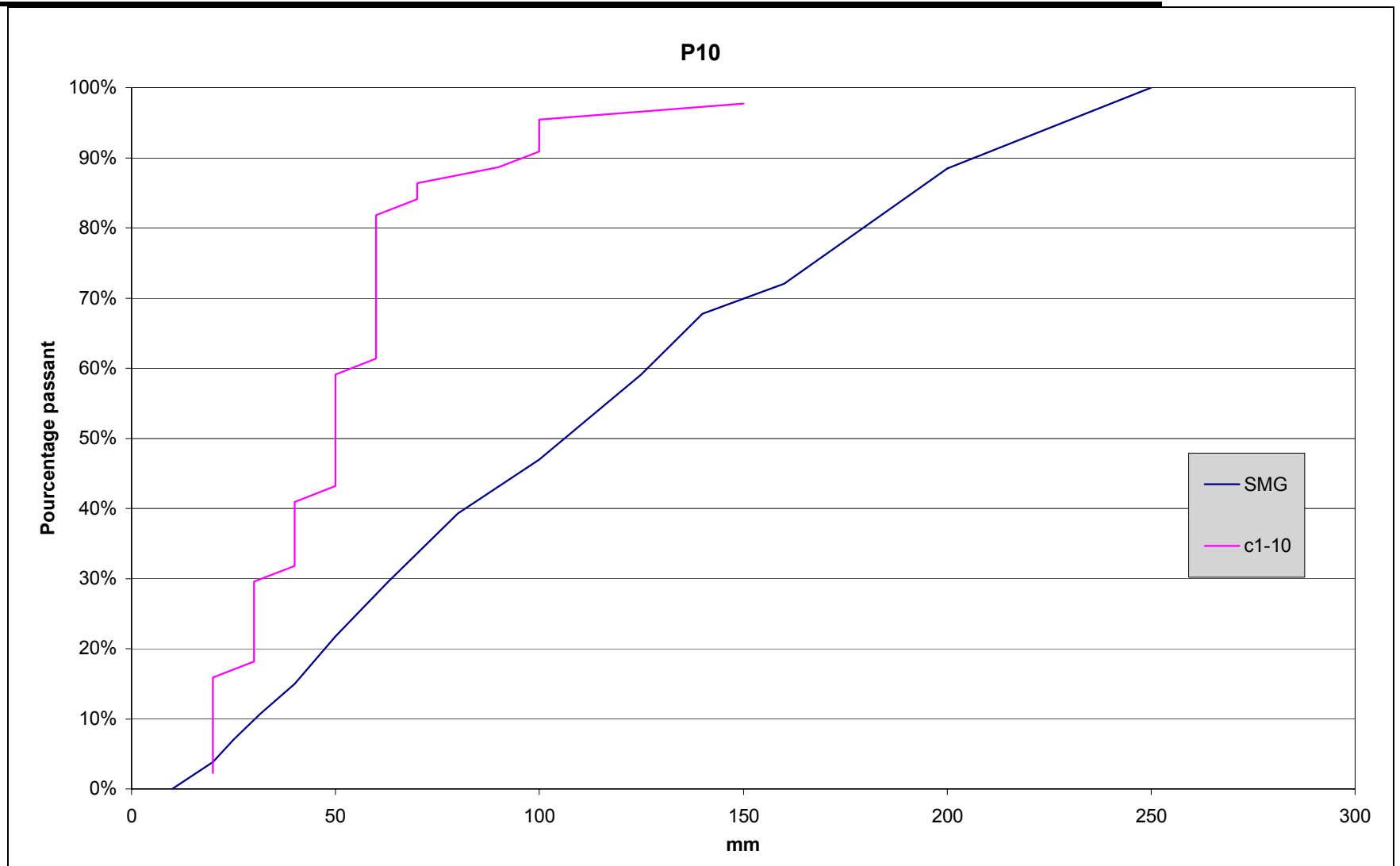
Cet écart s'explique aisément par l'érosion régressive très dense de cet affluent et donc par un pavage très important. De ce fait, les dimensions caractéristiques des granulats peuvent être très différentes à quelques mètres de distance.

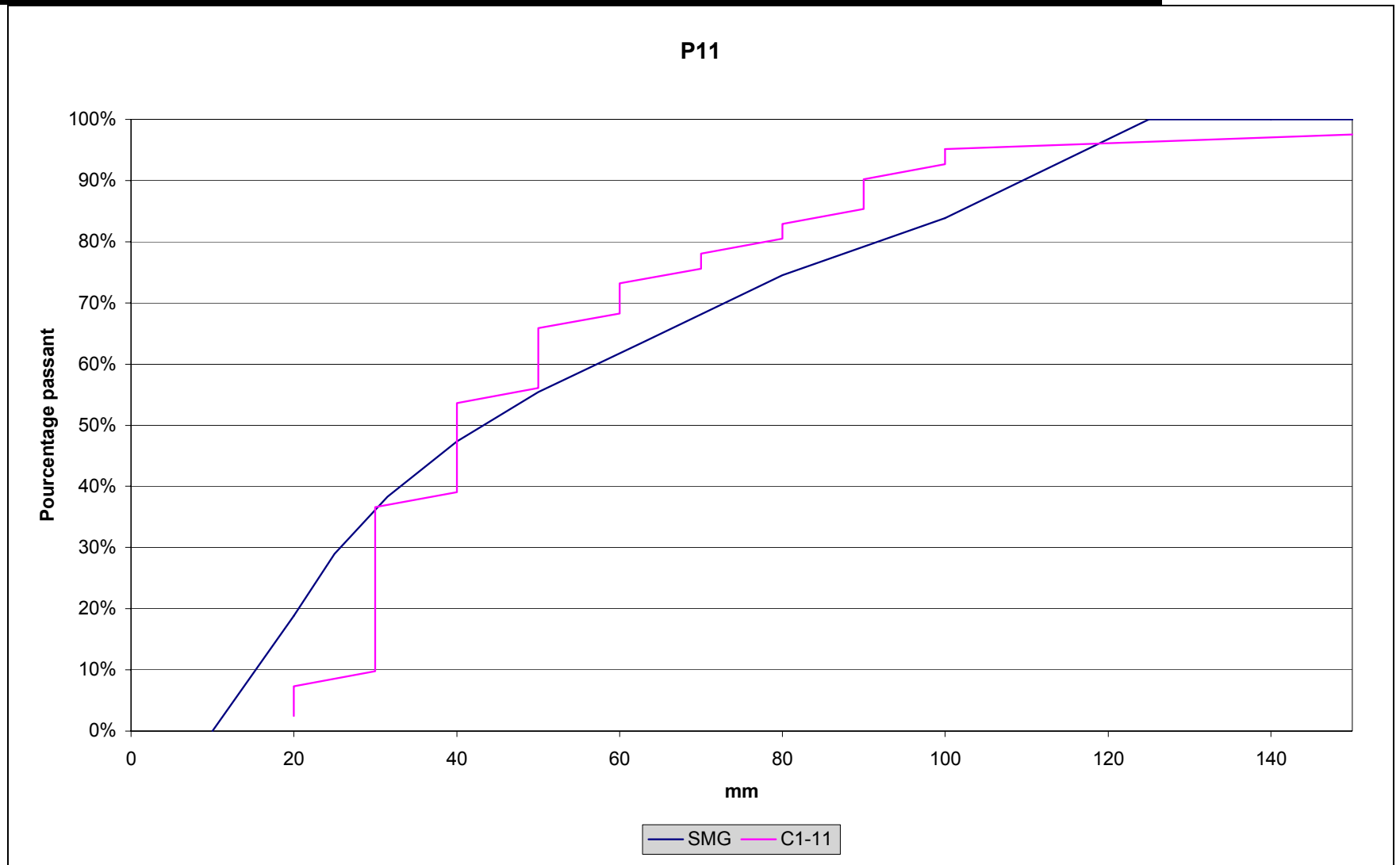
Suite à ces comparaisons, nous avons considéré que les analyses réalisées par comptage linéaire pouvaient être intégrées sans modification à l'analyse des conditions de reprise du transport solide.

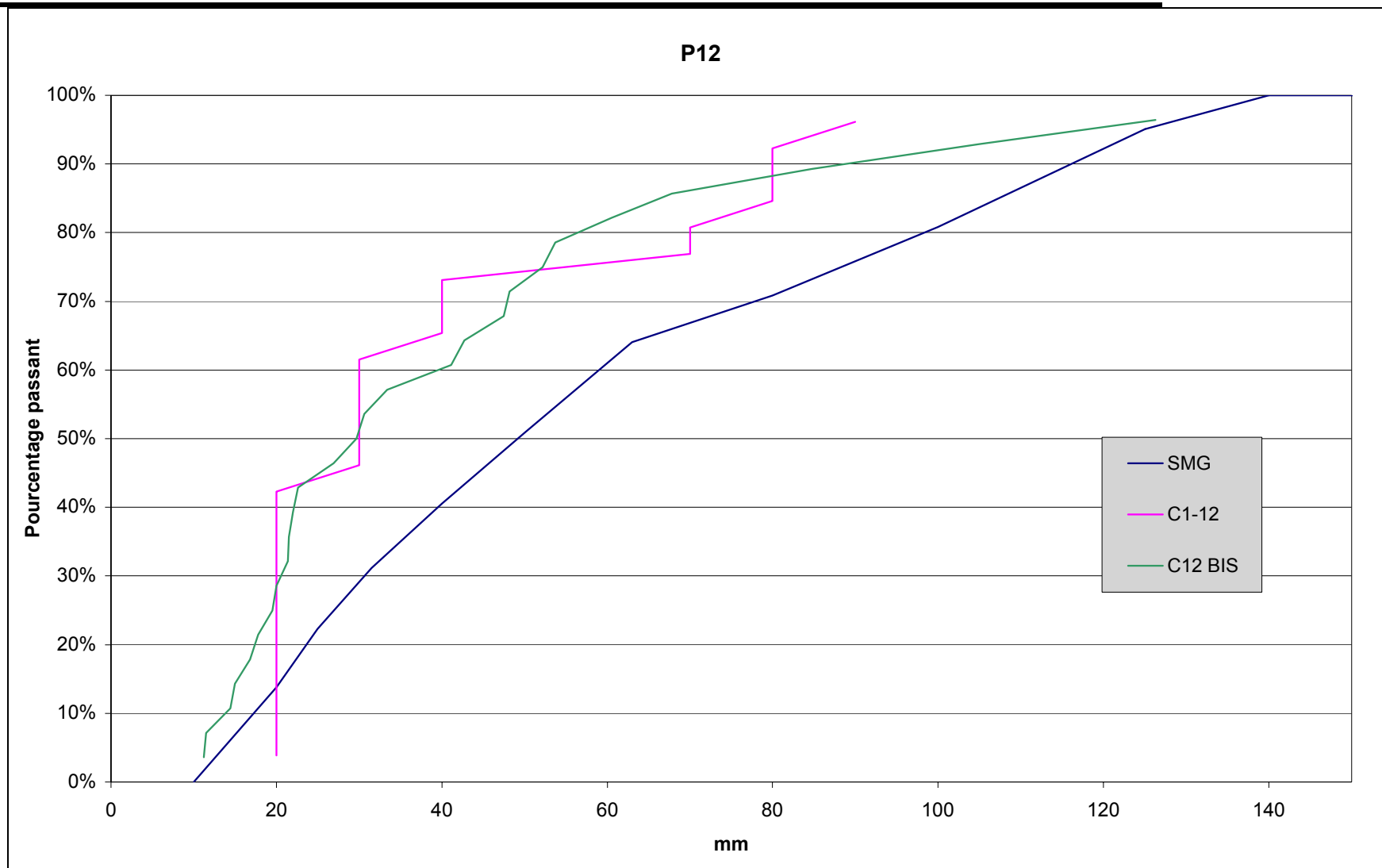












2.1.3.2.3. **ANALYSE DES GRANULOMETRIES**

L'évolution du Var dans la basse vallée conduit aujourd'hui à adopter des granulométries particulières par tronçon.

A. De la confluence avec la Vésubie à la confluence avec l'Estéron

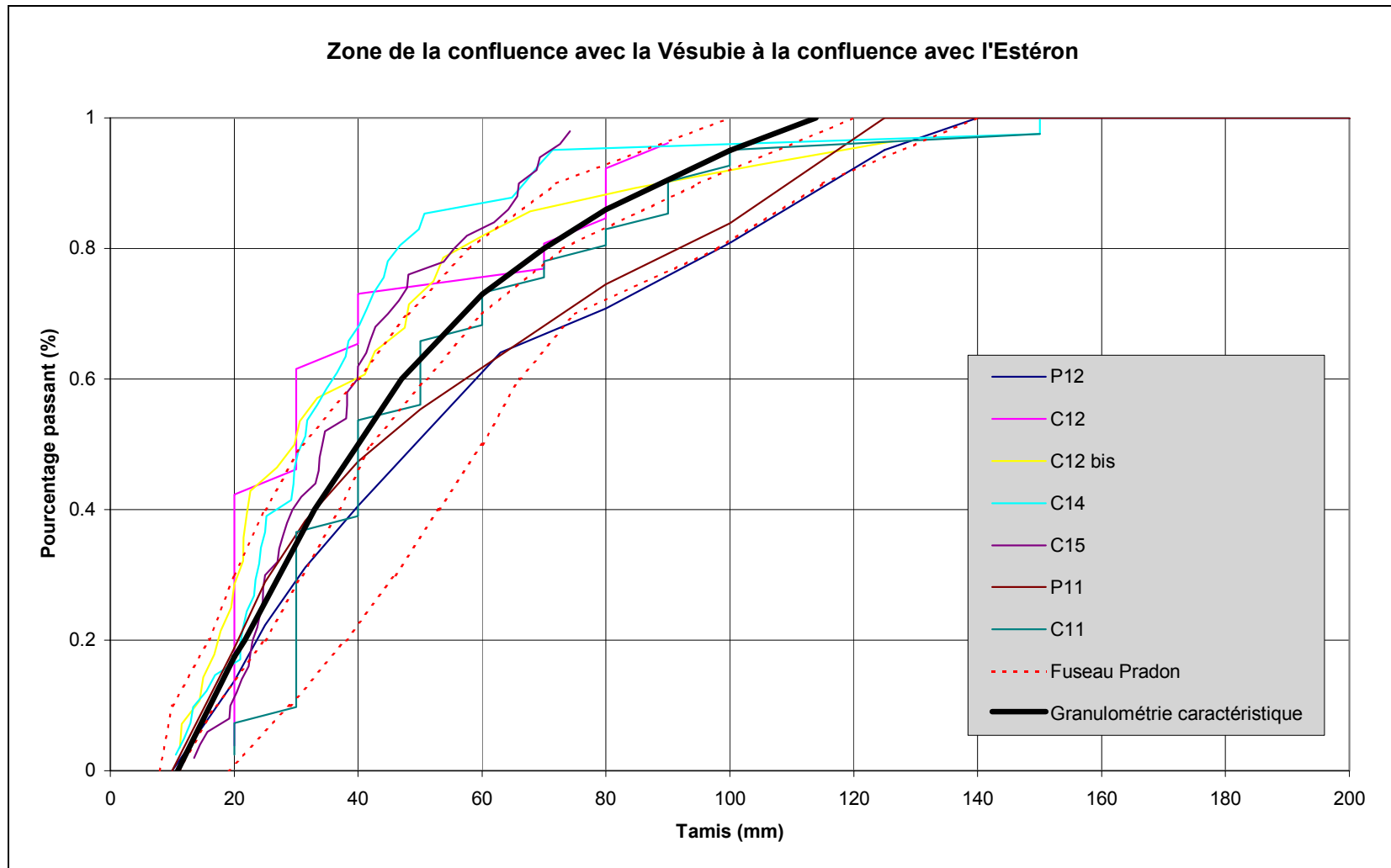
Deux prélèvements en masse ont été réalisés sur ce tronçon :

- P12 à l'amont à l'amont du pont Charles-Albert
- P11 juste à l'amont de la confluence avec l'Estéron

A ces 2 prélèvements il faut ajouter 4 comptages :

- C12, C12bis et C14 à l'amont à l'amont du pont Charles-Albert
- C15 à l'aval du seuil 16
- C11 juste à l'amont de la confluence avec l'Estéron

Le graphique ci-dessous permet de visualiser l'ensemble des faisceaux de courbes caractéristiques de ce tronçon, ainsi que leur positionnement par rapport au fuseau Pradon. La courbe en noir permet de visualiser la caractéristique médiane du fuseau mesuré, qui sera utilisée pour l'analyse ultérieure.



La granulométrie de ce secteur est donc aujourd'hui plus fine que celle de Pradon. Cela s'explique par les faibles apports amont en matériaux solides. Les importantes extractions réalisées dans le lit du Var à l'amont piègent les gros éléments et seuls les petits matériaux parviennent à l'aval. Les éléments en surface et dans une couche fine proche de la surface sont donc de diamètre moyen plus petit que les matériaux naturels du Var dans la basse vallée.

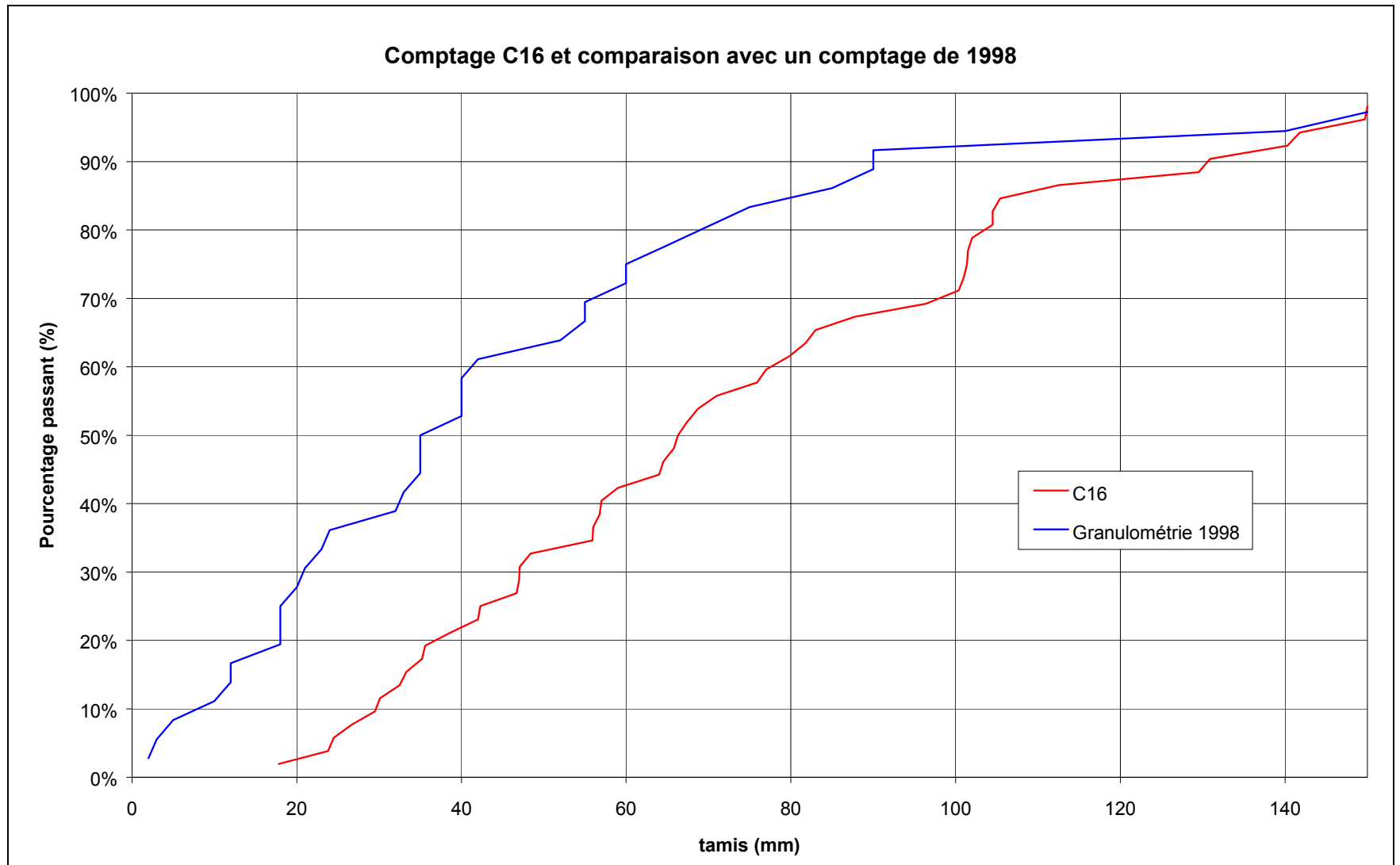
**B. Estéron à l'amont immédiat de la confluence**

Un seul comptage a été réalisé sur l'Estéron, juste à l'amont de la confluence avec le Var (C16). Les éléments présents dans le lit de l'Estéron à cet endroit sont très grossiers :

N°	Type	d <sub>50</sub> (mm)
C16	Comptage	67



*Matériaux grossiers du lit de l'Estéron juste à l'amont de la confluence*



L'Estéron subit depuis une dizaine d'année une forte érosion régressive. Cette dernière s'accompagne d'un pavage important du lit ce qui explique la granulométrie très grossière de l'affluent à cet endroit.

La courbe associée sur le graphique au comptage C16 et intitulée « granulométrie 1998 » correspond à un comptage linéaire effectué au même point, par SOGREAH, en 1998. On remarque une très forte augmentation de la granulométrie caractéristique, représentative de ce pavage.

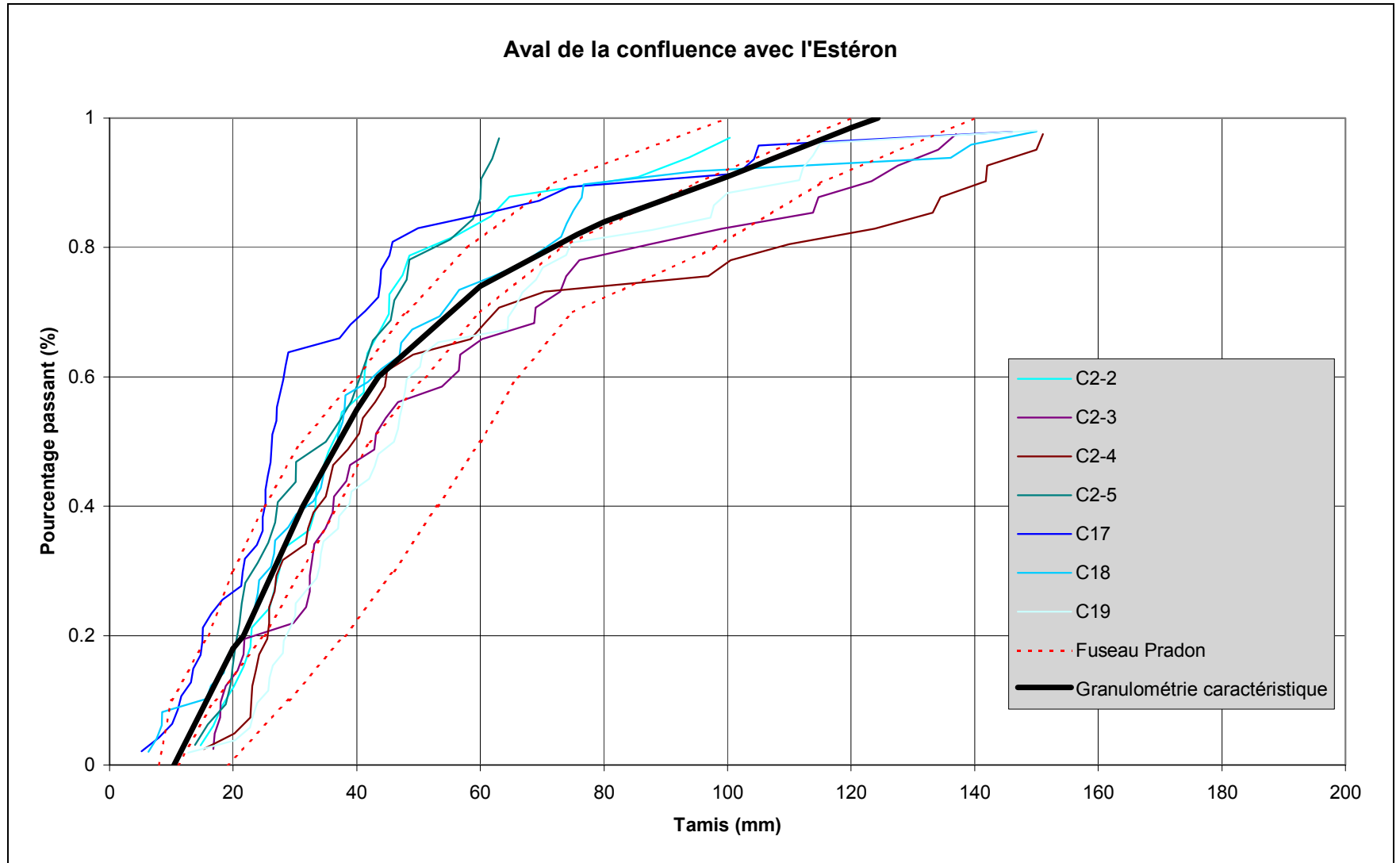
C. Aval de la confluence avec l'Estéron

Nous avons réalisé, sur ce secteur, 8 comptages à des endroits où le transport solide apparaît homogène c'est à dire à l'écart des zones influencées directement par la confluence.

- C2-2 à C2-5 régulièrement espacés de 100 m environ à l'aval de la confluence avec l'Estéron
- C17, C18, C19 à l'amont du seuil 10
- C2-1 à l'aval immédiat du seuil 10

Le tableau suivant synthétise les résultats de ces prélèvements et comptages :

N°	Type	d <sub>50</sub> (mm)
C10	Comptage	51
C2-2	Comptage	37
C2-3	Comptage	43
C2-4	Comptage	40
C2-5	Comptage	35
C17	Comptage	27
C18	Comptage	37
C19	Comptage	46



Au droit de la confluence, les différents prélèvements et comptages sont très hétérogènes, du fait de l'hétérogénéité des apports :

- Lors des crues de l'Estéron, ce sont des gros éléments ( $d_{50}=67$  mm) qui sont déposés
- Au cours des crues du Var, ce sont des éléments plus fins ( $d_{50}=38$  mm) qui sont apportés

Cette hétérogénéité est bien visible sur le site. Les bancs de matériaux grossiers côtoient des zones de matériaux très fins.



*Banc de matériaux grossiers*



*Zone d'éléments fins*

Les fins étant plus facilement charriés, on les retrouve en plus grand nombre à l'aval du tronçon ce qui donne une granulométrie assez fine à cet endroit.

Le comptage linéaire C10 ( $d_{50}=51$  mm) et le prélèvement P10 ( $d_{50}=105$  mm) réalisés au même endroit ne sont pas corrélés. Le comptage fournit des indications sur les matériaux en surface. Si la dernière crue survenue à cet endroit a apporté des matériaux fins du Var plutôt que des gros de l'Estéron, les éléments en surface présenteront une granulométrie plus fine que les matériaux en profondeur.

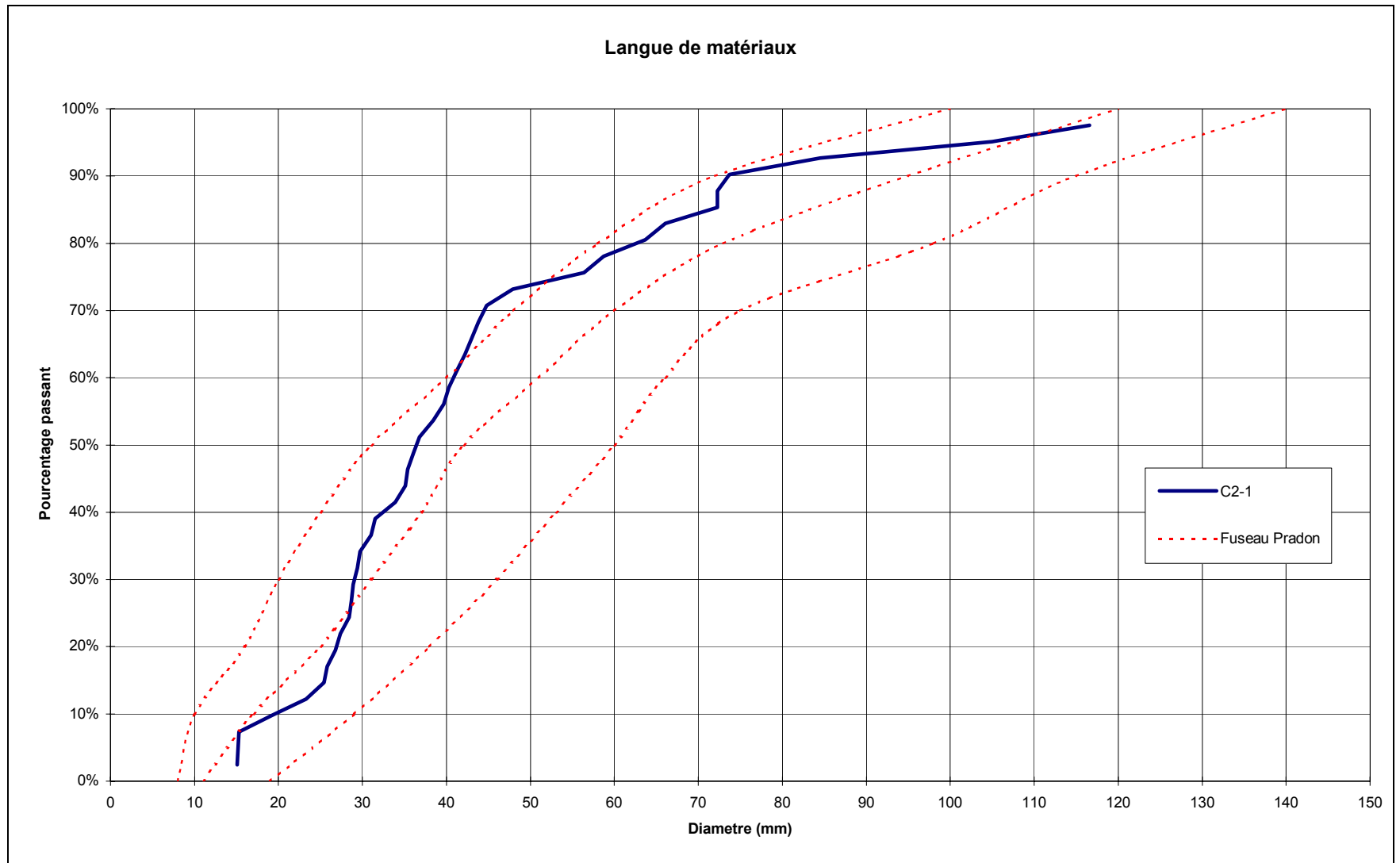
Il convient de considérer pour le tronçon Estéron-seuil 10 les comptages aval (C2-2, C2-3, C2-4, C2-5, C17, C18, C19) représentés par la courbe granulométrique en noir sur le graphique précédent.

D. Langue de matériaux

A l'aval du seuil 10, une langue de matériaux est actuellement en progression. Les matériaux de cette langue sont constitués d'un mélange d'apports du Var et de l'Estéron. Ces matériaux, qui ont en 2002 quasiment rempli le bief du seuil 10 au seuil 9, devraient continuer à progresser vers l'aval.

Le comptage C2-1 a été réalisé à l'aval immédiat du seuil 10 qui a été atteint par la langue de matériaux actuellement en évolution.

N°	Type	$d_{50}$ (mm)
C2-1	Comptage	37



La courbe précédente peut être considérée comme la courbe granulométrique caractéristique des matériaux de cette langue.

E. De l'aval du seuil 4 à la mer

Quatre prélèvements en masse ont été réalisés sur ce tronçon :

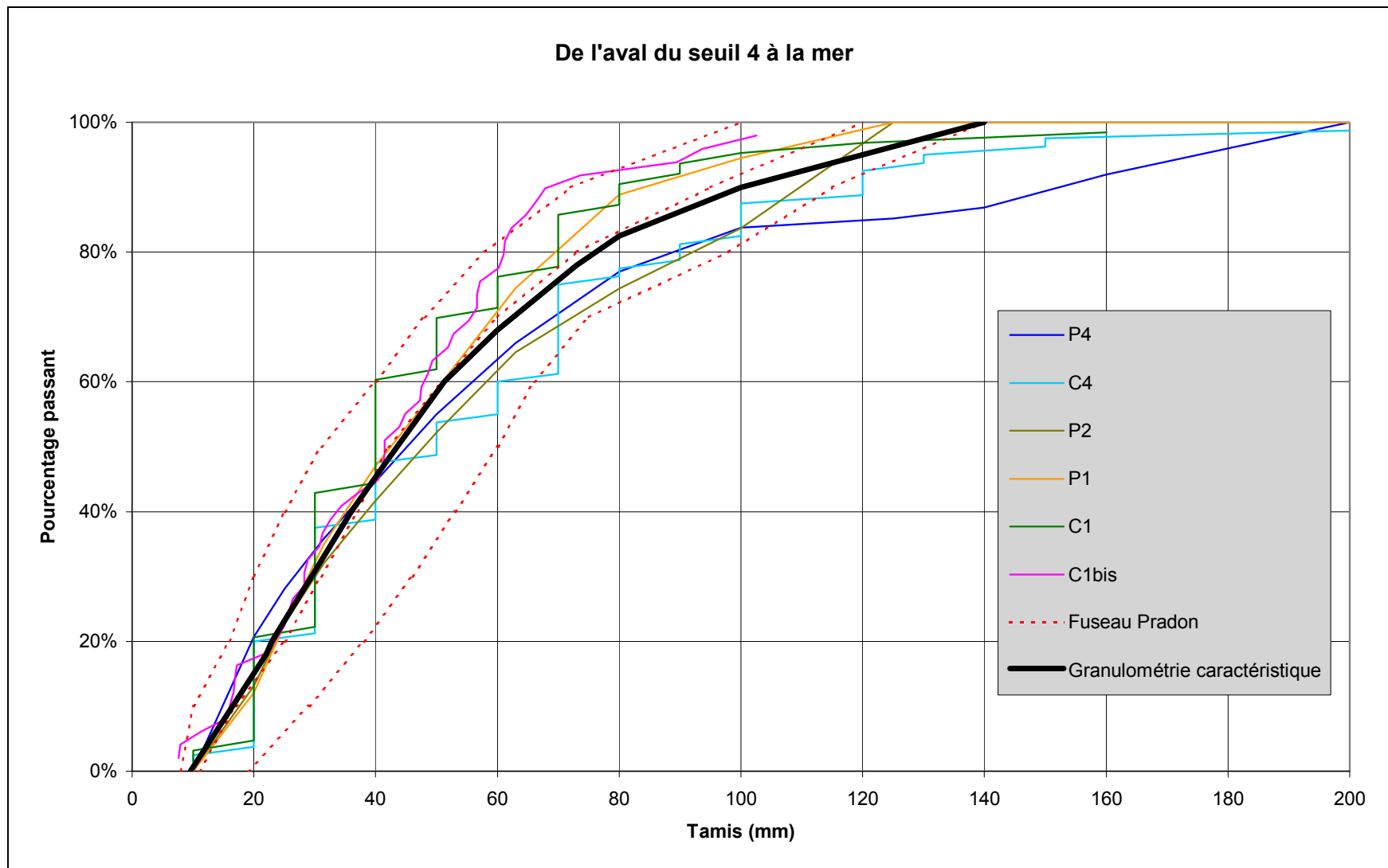
- P5 à l'aval immédiat du seuil 4
- P4 à l'aval immédiat de l'ancien seuil 3
- P2 à l'aval immédiat du futur franchissement sud de la RN 202 bis
- P1 à l'amont immédiat du pont Napoléon

A ces 4 prélèvements il faut ajouter 9 comptages :

- C4 à l'aval immédiat de l'ancien seuil 3
- C1 et C1bis au niveau du pont Napoléon

Le tableau suivant synthétise les résultats de ces prélèvements et comptages :

N°	Type	d <sub>50</sub> (mm)
P5	Prélèvement	64
P4	Prélèvement	47
C4	Comptage	50
P2	Prélèvement	48
P1	Prélèvement	41
C1	Comptage	40
C1bis	Comptage	42



Ces autres comptages et prélèvements montrent des granulométries homogènes et très proches du fuseau Pradon. Les apports amont en matériaux solides sont quasiment inexistantes sur ce tronçon et on trouve les éléments naturels du lit du Var.

### 2.1.3.3. BILAN

Les matériaux du Var dans la basse vallée présentent donc aujourd'hui une grande disparité. Il n'est plus possible de les assimiler au « fuseau Pradon » mais il semble préférable d'utiliser aujourd'hui les fuseaux granulométriques suivants :

Tronçons	d <sub>30</sub> (mm)	d <sub>50</sub> (mm)	d <sub>90</sub> (mm)
Pradon	31	44	95
De Plan du Var à la confluence avec l'Estéron	24	40	90
De l'Estéron au seuil 10	23	37	96
Du seuil 10 au seuil 9 (langue de matériaux)	27	36	78
Du seuil 4 à la mer	30	44	98

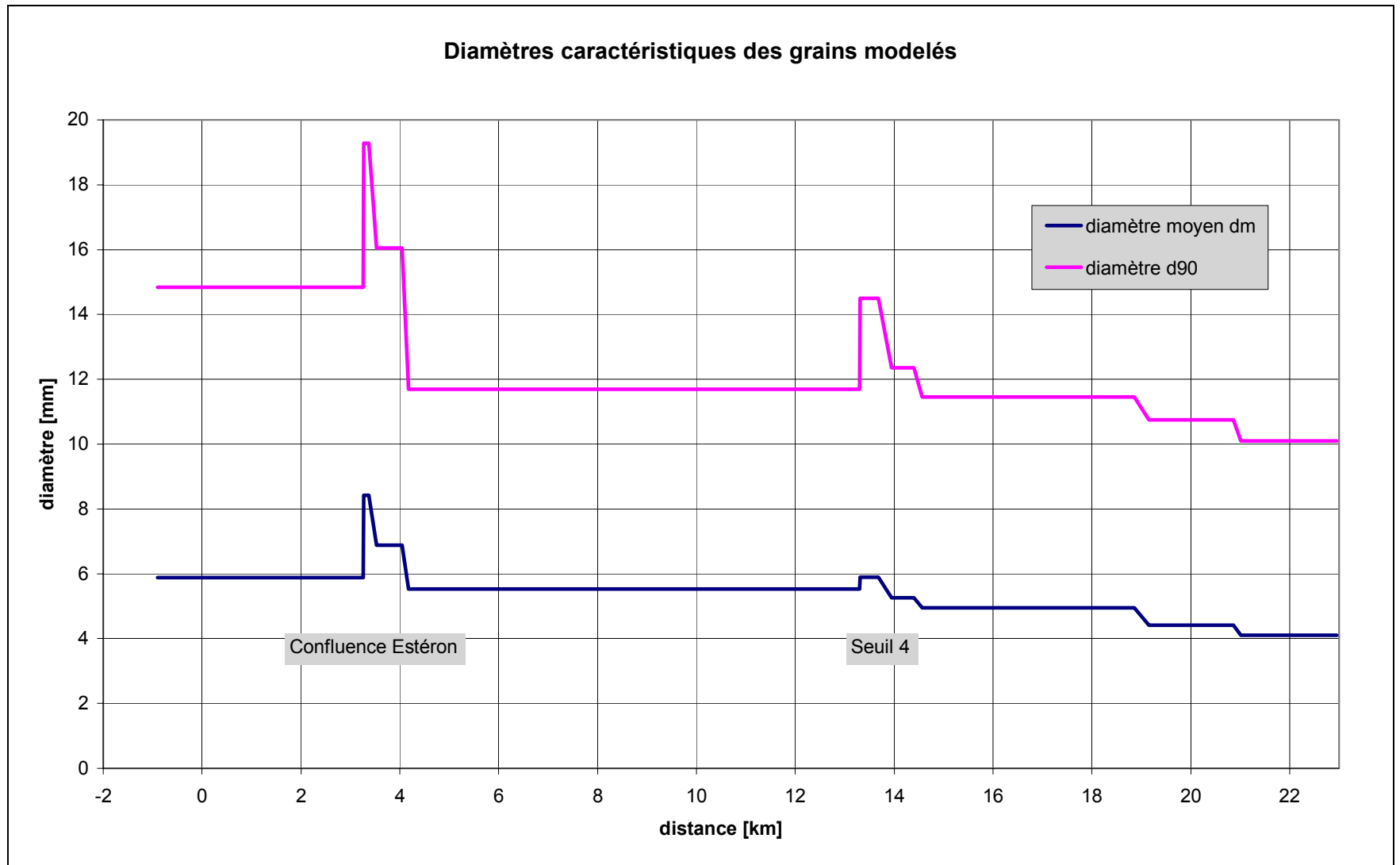
Il est à noter que quelques prélèvements ou comptages réalisés ont été écartés de l'analyse pour certaines raisons (incohérence évidente des mesures, mauvais choix de localisation, ...).

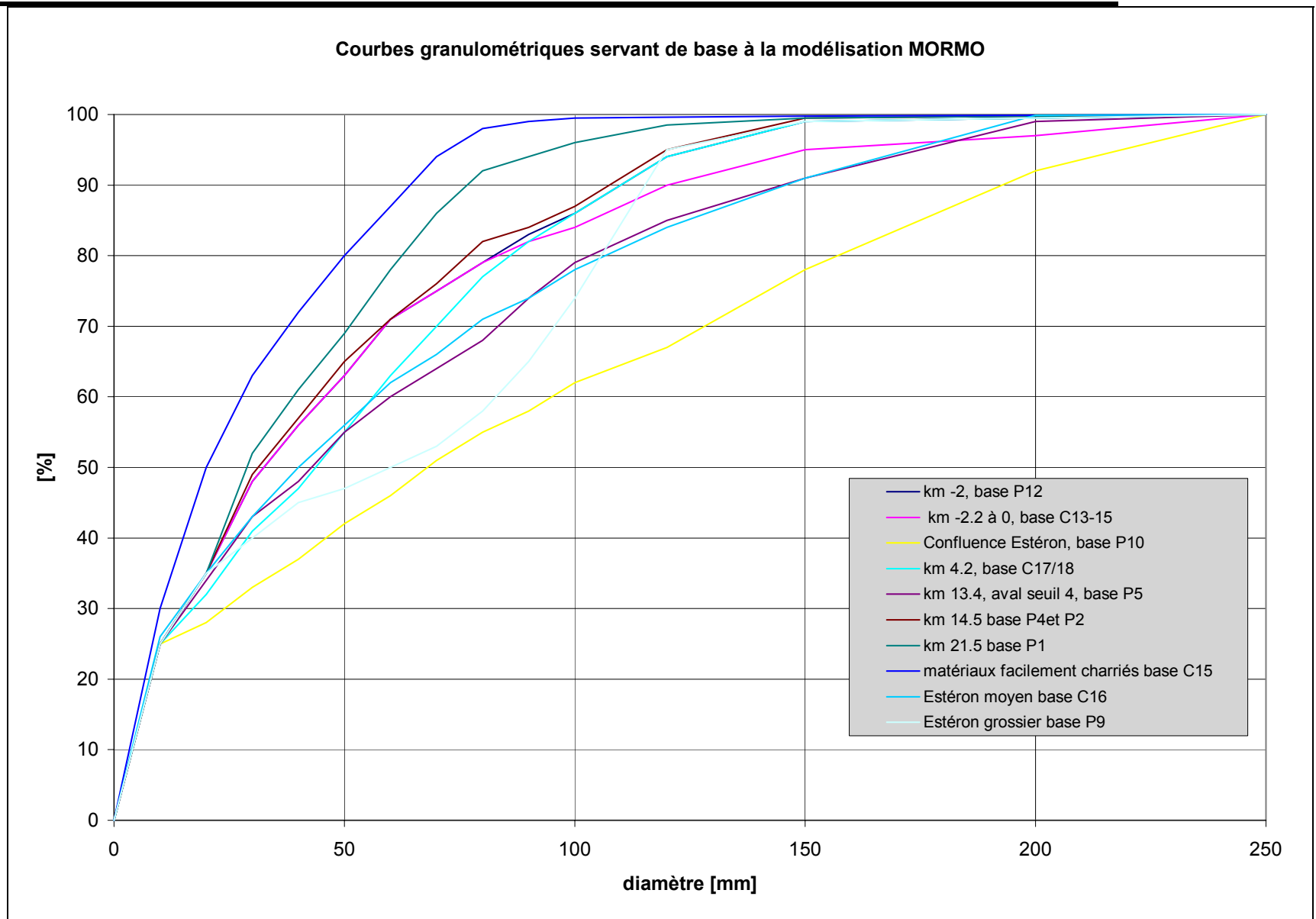
### 2.1.3.4. CHOIX DE LA GRANULOMETRIE POUR LA SIMULATION AVEC LE PROGRAMME MORMO

Pour le modèle MORMO, il était nécessaire de définir à partir des nouveaux fuseaux granulométriques, des courbes granulométriques adaptées à chaque tronçon de la basse vallée.

Le programme MORMO calcule la masse charriée par fractions granulométriques. Afin d'obtenir une performance optimale du modèle, il est donc nécessaire d'introduire les données granulométriques d'une manière aussi représentative que possible. Il faut tenir compte des conditions locales, par exemple l'apport de l'Estéron. On décrit la granulométrie en un profil par le pourcentage de fractions, les fractions étant décrites par un diamètre inférieur et supérieur. En aval d'un profil, où l'on a introduit une répartition granulométrique, le programme admet une répartition identique. Une diminution ou une augmentation des diamètres doit donc être introduite par une variation « par paliers ».

La première figure ci-après donne la vue d'ensemble des diamètres représentatifs choisis. La valeur du diamètre moyen  $d_m$  est une moyenne pondérée calculée à partir de toutes les fractions. Sa valeur est en général proche du  $d_{65}$ . On remarquera l'influence de l'Estéron, le pavage à l'aval du seuil 4 et la diminution plus ou moins linéaire à partir du seuil 4.





La deuxième figure documente les courbes granulométriques, qui ont été introduites en modèle et dont sont dérivées les valeurs de la première figure. Les courbes dérivées des échantillons P12, respectivement C13-C15, sont donc représentatives pour l'amont du tronçon modelé du Var. La même courbe a été choisie pour l'apport amont modelé. P16, la courbe la plus grossière de tous les échantillons, est considérée représenter sur un court tronçon la granulométrie au droit de la confluence avec l'Estéron. Une courbe dérivée des comptages C17 et C18 est ensuite choisie jusqu'à la langue de gravier en aval du seuil 9. Pour des raisons de simplicité, cette courbe a été maintenue dans la partie limoneuse. En principe, ce sont les dépôts de limons « consolidés » qui sont ainsi représentés, qui ne se déplacent pas, lorsque la langue de gravier progresse. En aval immédiat du seuil 4, c'est l'échantillon P5 qui est représentatif. On passe ensuite assez rapidement (du P.K. 13.4 au P.K. 14.5), à une courbe basée sur les échantillons 2 et 4. Ces valeurs sont maintenues jusqu'au P.K. 18.8 ; ensuite on passe de façon linéaire à l'échantillon P1. Finalement, la courbe P9 a servi pour définir la granulométrie de l'apport solide de l'Estéron.

Les courbes des échantillons P ont été traitées de la façon suivante :

- Ayant remarqué, qu'il manquait systématiquement les fractions les plus fines, nous avons rajouté 25 % de matériaux plus fins que 10 mm
- Des échantillons divers en provenance d'endroits rapprochés montrent des différences à cause d'une variation locale de la répartition granulométrique. Il y a des échantillons plus fins, représentant des matériaux facilement mis en mouvement (par exemple courbe C15 du deuxième graphique). D'un autre côté, il existe une enveloppe grossière dont certains échantillons se rapprochent, mais les composantes les plus grossières manquent. On a donc rajouté dans ces cas un faible pourcentage des composantes les plus grossières

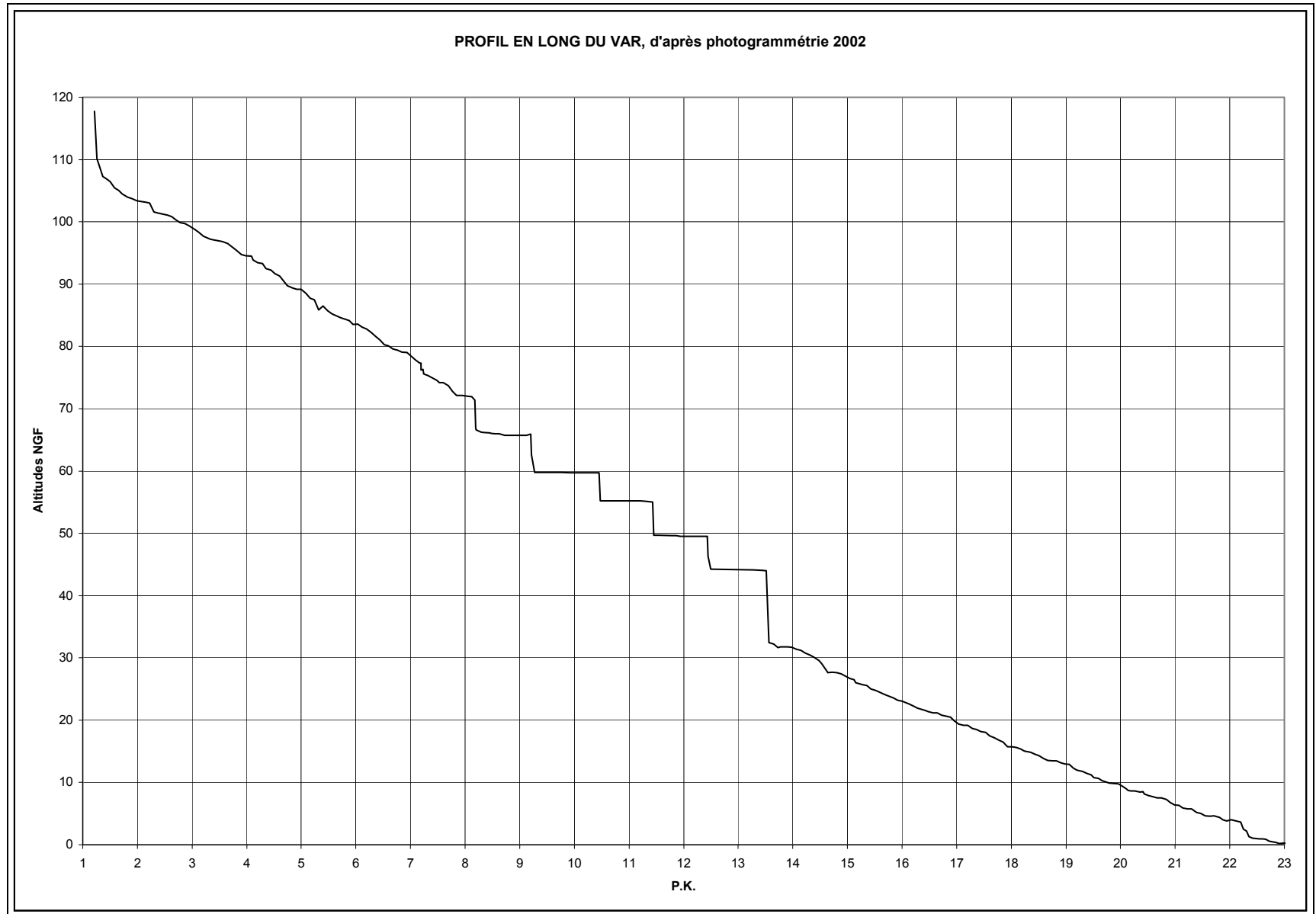
## **2.2. SITUATION ACTUELLE**

### **2.2.1. PROFIL EN LONG 2002**

Il s'agit du profil relevé par photogrammétrie en 2002 depuis la confluence avec la Vésubie jusqu'à, la mer. Ce profil a déjà été détaillé plus haut dans ce rapport.

Nous rappelons ici les pentes moyennes et le profil en long des principaux secteurs.

Bief	Pente 2002 (%)
Mer-seuil 2	3.4
Seuil 2-seuil 4	4.0
Seuil 10-Estéron	5.2
Estéron-seuil 16	5.0
Seuil 16-Vésubie	4.9
Estéron aval	8.1

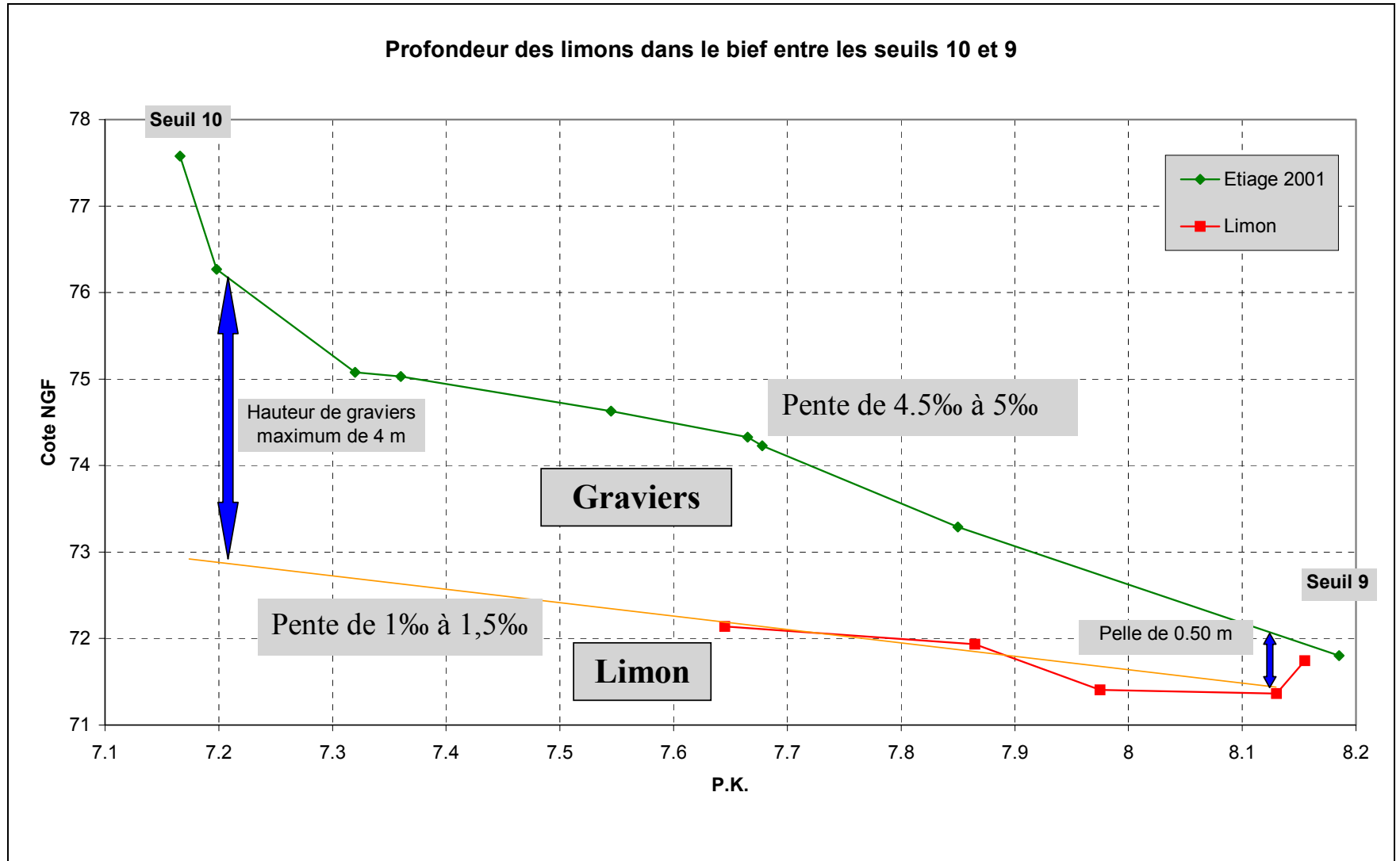


### 2.2.2. ANALYSE DU BIEF SEUIL 9 - SEUIL 10

Le fond du lit du Var est composé exclusivement de gravier. Toutefois, les souilles entre les seuils de la basse vallée (du seuil 10 au seuil 4) se sont enluminées du fait de la forte diminution de l'apport amont. La pente dans les biefs est alors de 1‰ à 1.5‰. Les graviers sont aujourd'hui revenus dans le bief seuil 9 – seuil 10. Il était intéressant de connaître, pour l'évaluation du volume de matériaux nécessaires au remplissage des biefs successifs, la profondeur de l'interface limon-gravier dans ce bief.

Des mesures de la profondeur de la couche de limon ont été réalisées sur un banc au milieu du lit à l'amont immédiat du seuil 9. Ces mesures ont permis de constater que seul un très faible volume de limon était évacué à la suite de l'arrivée des graviers. En effet, les mesures ont montré qu'à l'amont immédiat du seuil 9, les limons avaient été évacués sur une épaisseur de 0.50 m environ. La couche de limon présente à plus à l'amont une pente de 1‰ à 1.5‰. Les graviers qui se sont déposés dans le bief, au-dessus de la couche de limon, présentent une pente de 4.5‰ à 5‰. A l'aval immédiat du seuil 10, la couche de gravier atteint donc une hauteur d'environ 4 m. Le graphique de la page suivante montre les résultats des fouilles effectuées à l'amont du seuil 9 pour déterminer la profondeur de la couche de limon.

Le volume de matériaux nécessaire pour remplir un bief moyen de longueur 900 m et de 220 m de large est donc d'environ 400 000 m<sup>3</sup>.



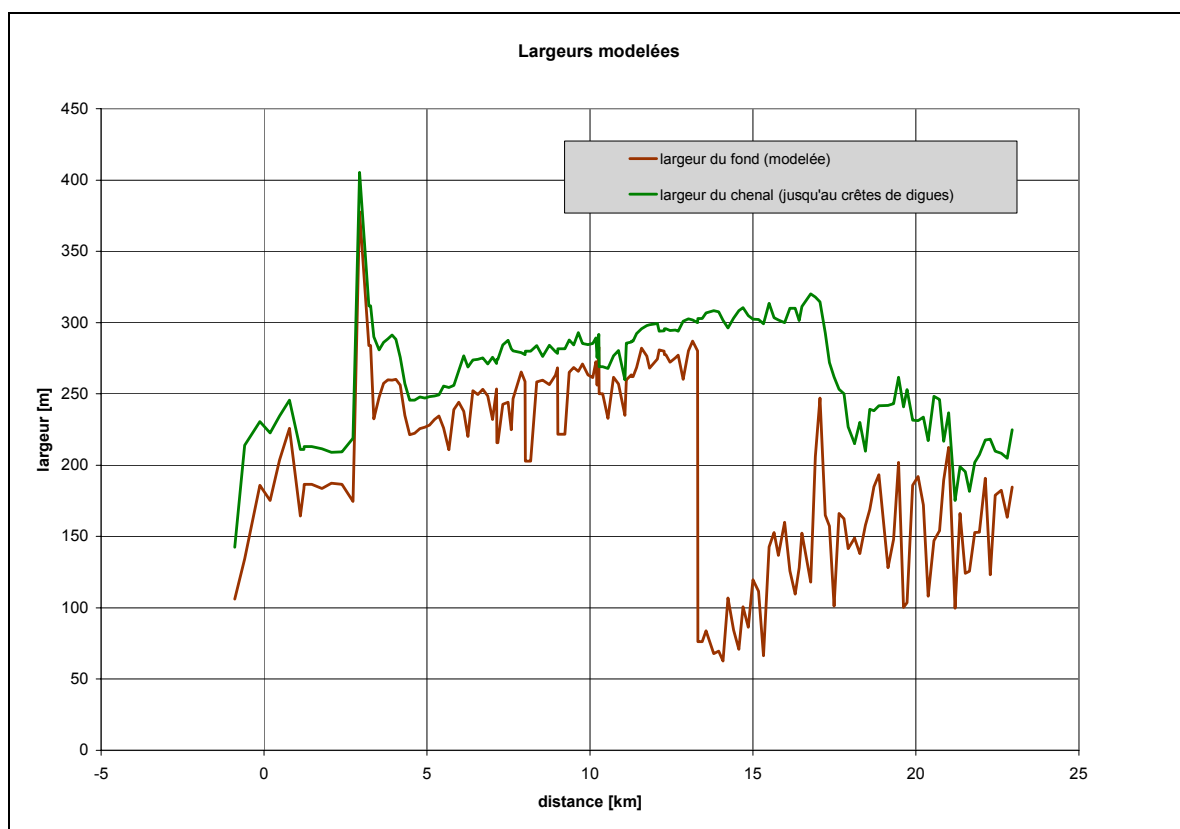
### 2.2.3. CALAGE DU MODELE MORMO

Afin d'établir le régime du charriage actuel du Var, et d'apprécier les évolutions futures, le Var a été simulé entre la confluence avec la Vésubie et l'embouchure à la mer, selon les principes décrits sous 2.2.4. Une branche représente le tronçon de la Vésubie à l'Estéron, une deuxième celui de l'Estéron à la mer. La confluence avec l'Estéron est représentée par un nœud, ce qui permet la simulation de l'apport liquide et solide de cet affluent.

Les données suivantes, décrites plus haut, ont été utilisées :

- Profils en travers du Var d'avril 1995
- Profil en long du Var levé en août 2001 pour le compte de la DDE des Alpes Maritimes
- Hydrologie du Var et de l'Estéron d'avril 1995 à août 2001
- Granulométries des différents tronçons évaluées en 2002

Une particularité de la modélisation était la largeur du lit actif à introduire en modèle. Le modèle fait la différence entre la largeur endiguée et la largeur du lit actif. Dans les parties avec formation de tresses (Vésubie au seuil 10, aval à partir du km 19 environ) la largeur limitée par les pieds de berges de chaque coté est considérée comme largeur active du Var et introduite comme telle dans le modèle (figure ci-dessous). La largeur du lit actif n'est ici que de peu inférieure à la largeur endiguée. Par contre, en aval du seuil 4, le Var s'est fortement incisé dans ses propres sédiments et a créé un chenal d'environ 80 m de large. Comme l'avait montré le modèle physique du franchissement de la RN202bis à St Isidore, pour les crues fréquentes le débit et le charriage restent concentrés dans ce chenal. Des crues plus importantes, mêmes de l'ordre de 2000 m<sup>3</sup>/s, débordent sur le reste du lit, mais ne l'utilisent en quelque sorte que comme un lit majeur. Le charriage est beaucoup moins important ou même inexistant. Nous avons donc considéré la largeur du lit actif de ce chenal incisé comme largeur active du Var à l'aval du seuil 4. Cette largeur augmente de façon quasi-linéaire jusqu'au km 19.



Les paramètres inconnus, nécessaires à la modélisation, sont avant-tout les apports solides du Var et de l'Estéron. On procède donc d'abord à un calage du modèle. On connaît les déformations que le lit du Var a subi pendant la période d'avril 1995 à août 2001, ce sont notamment :

- Une légère érosion à l'aval de la confluence avec la Vésubie
- Un très léger abaissement au pied du seuil 16
- L'avancement de la langue de gravier au seuil 9
- La forte érosion au pied du seuil 4

Le calage consiste donc à estimer certaines valeurs pour les apports inconnus, à simuler la période de calage (avril 1995 à août 2001), et ensuite de vérifier la performance du modèle par rapport aux dépôts et érosions connues. Par itération, on obtient les valeurs les plus plausibles pour les apports. L'influence des apports reste limitée sur une certaine distance vers l'aval. Si la performance du modèle n'est pas satisfaisante en d'autres points, on peut faire varier d'autres données de base, comme la granulométrie, la largeur active du fond, ... Ceci évidemment dans certaines limites qui correspondent aux domaines de précision de l'évaluation de ces paramètres. En particulier, les érosions au pied du seuil 4 ne sont fonction que de la granulométrie locale et de la largeur active considérée, puisque de toute façon le charriage est interrompu entre les seuils 4 et 8.

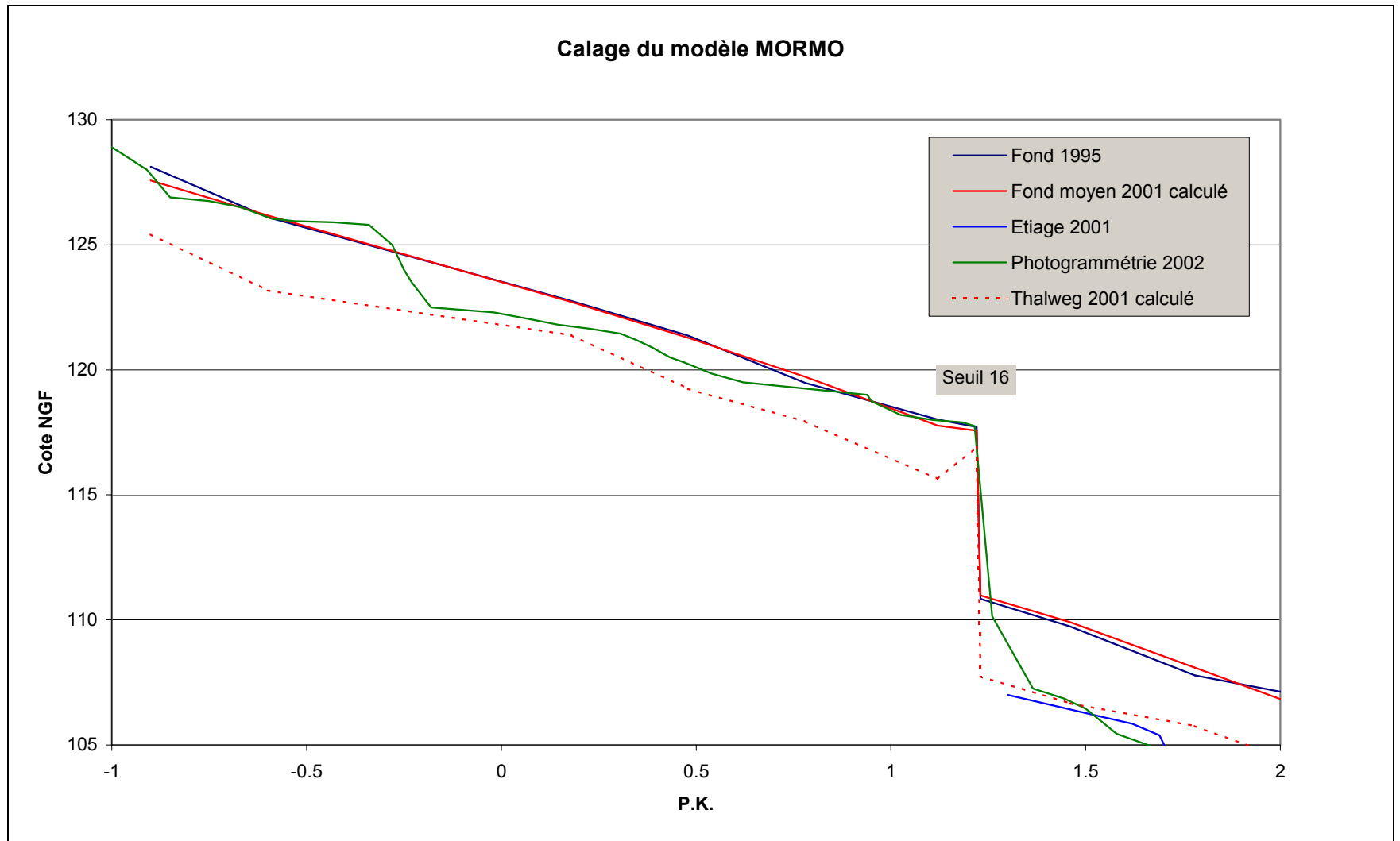
L'apport solide est exprimé par une relation entre le débit solide et le débit liquide. Un coefficient introduit dans cette relation est varié jusqu'à l'obtention de la performance voulue.

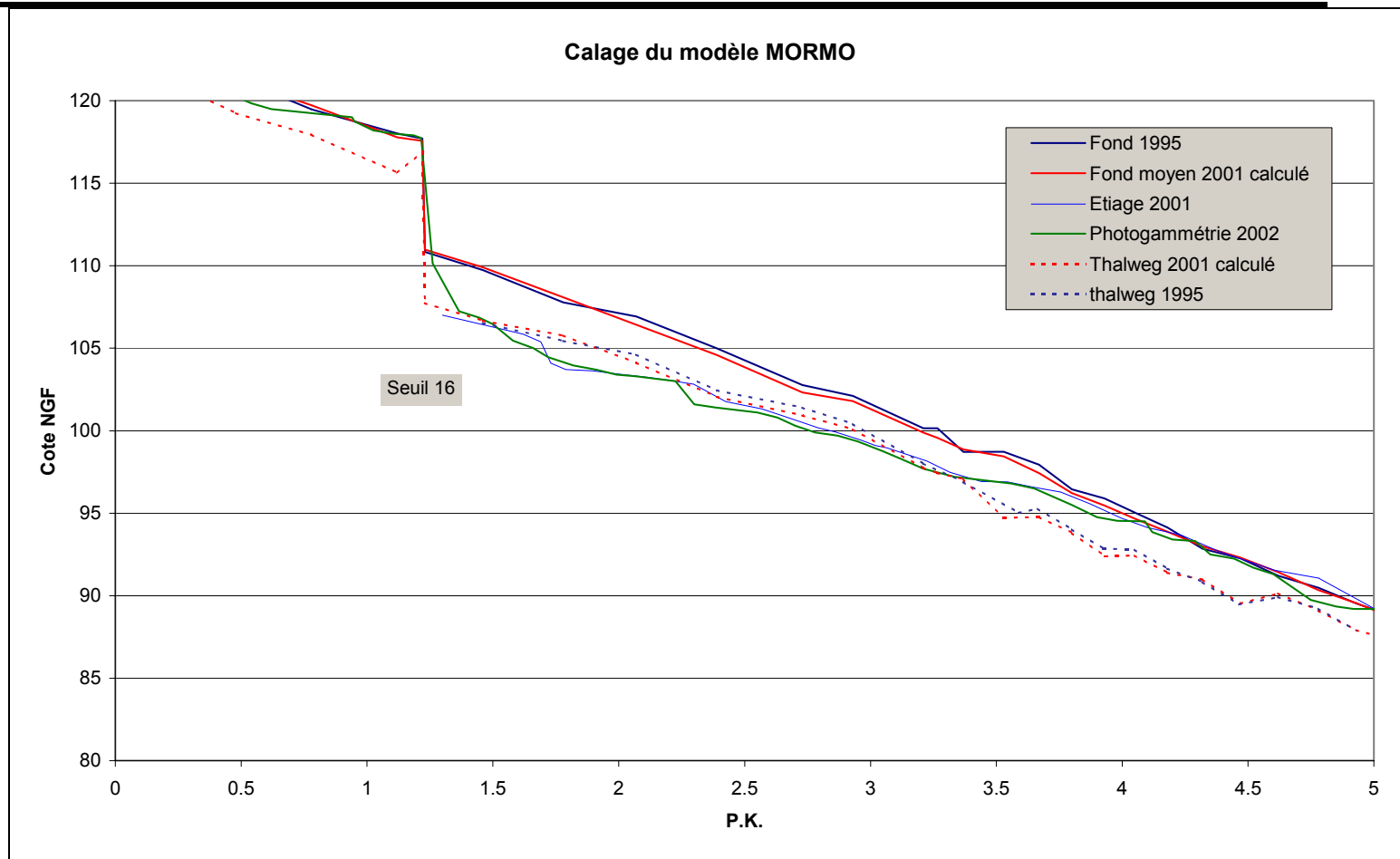
Le résultat du calage est documenté par les figures suivantes, qui permettent la comparaison des fonds calculés avec les fonds relevés en 2001 et 2002.

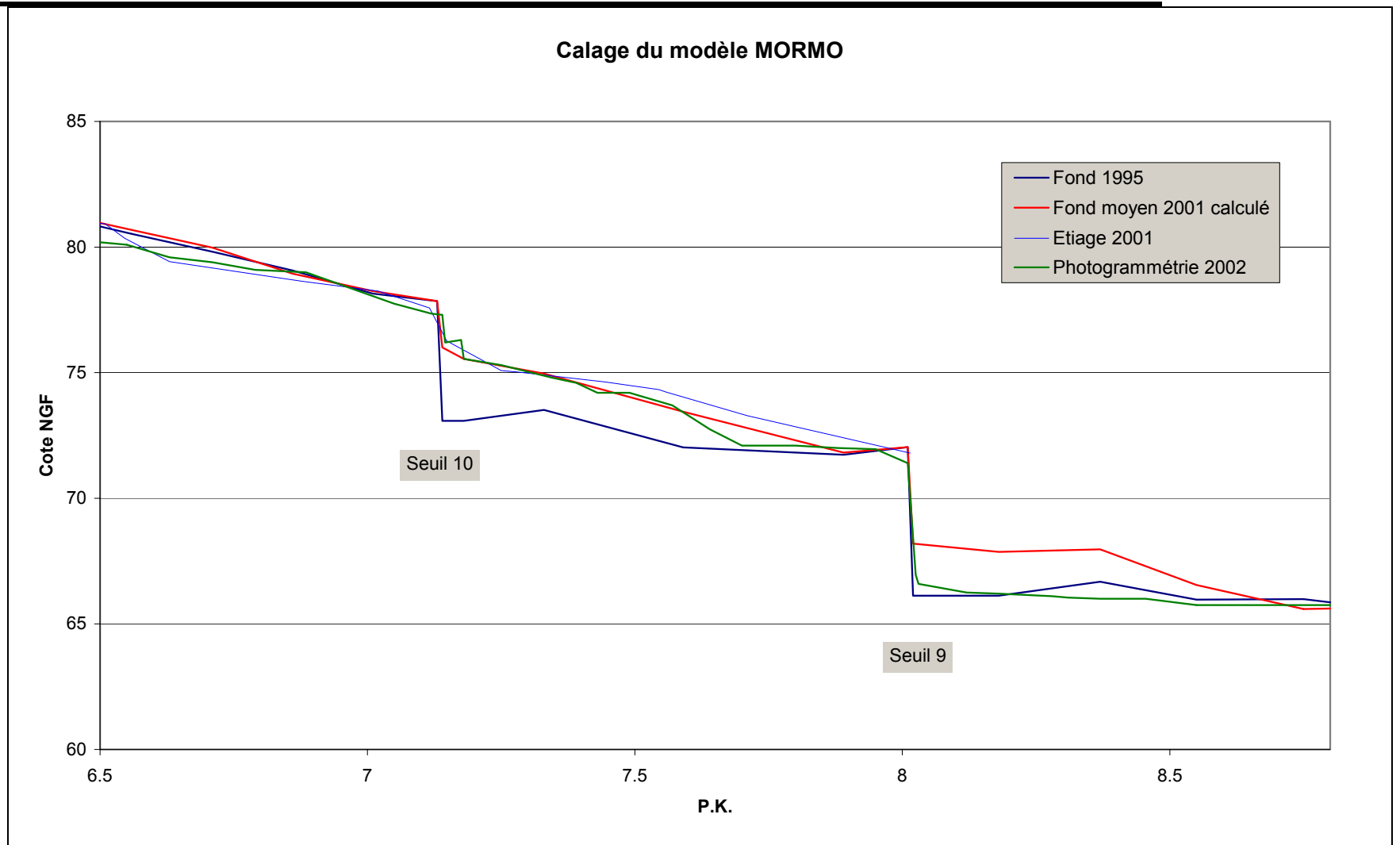
La comparaison nécessite une interprétation, puisqu'il s'agit de comparer des cotes de fond moyen calculées par le programme, avec des cotes de lignes d'eau d'étiage. Ainsi la cote de fond moyen, calculé en faisant la moyenne des cotes du fond du lit sur un profil en travers est en général plus haute que la cote d'étiage. Dans les graphiques, nous avons ajouté les cotes du thalweg lorsque cela contribue à la clarté de l'interprétation.

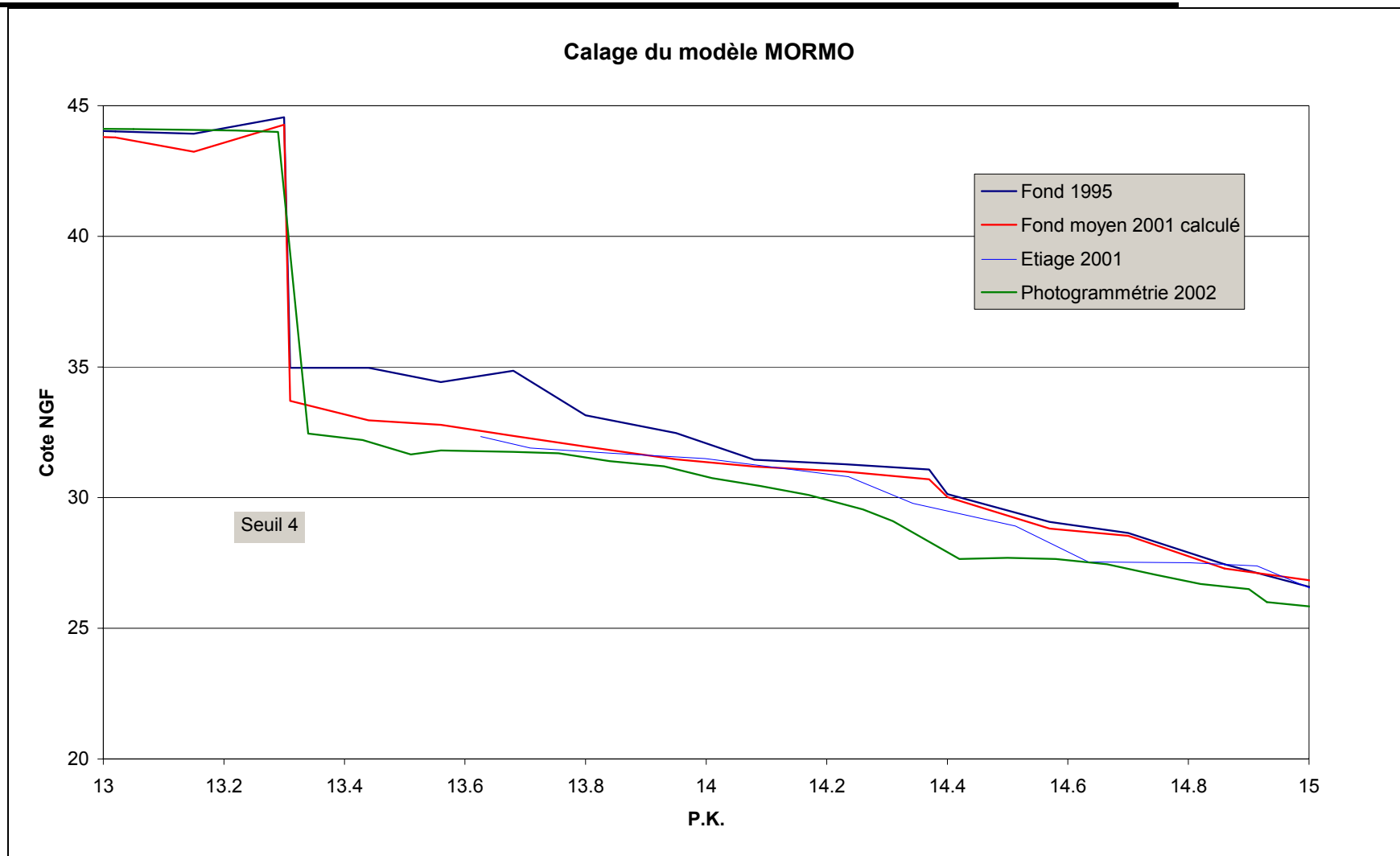
Remarques concernant la performance du modèle et la qualité du calage (confère figures ci-après) :

- Le programme simule la légère érosion au droit à la confluence avec la Vésubie. La ligne d'eau tirée de la photogrammétrie se situe logiquement entre fond moyen et cote du thalweg
- La déformation calculée (fonds moyens et thalweg) n'est que légère. Les cotes du thalweg correspondent plus ou moins aux niveaux récemment relevés. Il y a un début d'incision à l'aval du seuil 16 comme au seuil 4, mais nettement moins prononcé. La modélisation n'en tient pas compte (grande largeur au fond). Il subsiste donc une incertitude, si la formation du chenal étroit continue et si l'érosion future est activée à cause de la concentration de l'écoulement dans ce chenal
- Considérant l'ensemble du bief entre le seuil 9 et 10, le programme a pu simuler le remplissage de manière satisfaisante. En aval du seuil 9, le modèle était un peu « en avance » puisqu'il anticipe déjà les dépôts qui en nature ne se sont produits que lors de la crue de novembre 2002
- A l'aval du seuil 4, on retrouve le même abaissement, de l'ordre de 2.5 m, par le calcul ou par les cotes relevées









#### 2.2.4. REGIME ACTUEL DU CHARRIAGE

Le calage permet de tirer directement des conclusions sur le régime actuel du charriage du Var. Le modèle calcule les volumes charriés le long du tronçon simulé. On peut donc représenter ces volumes, rapportés à une moyenne annuelle, représentative pour la période de calage de 1995 à 2001, en fonction de la distance. Ce résultat qui donne une image du régime du charriage est représenté sur la figure ci-après.

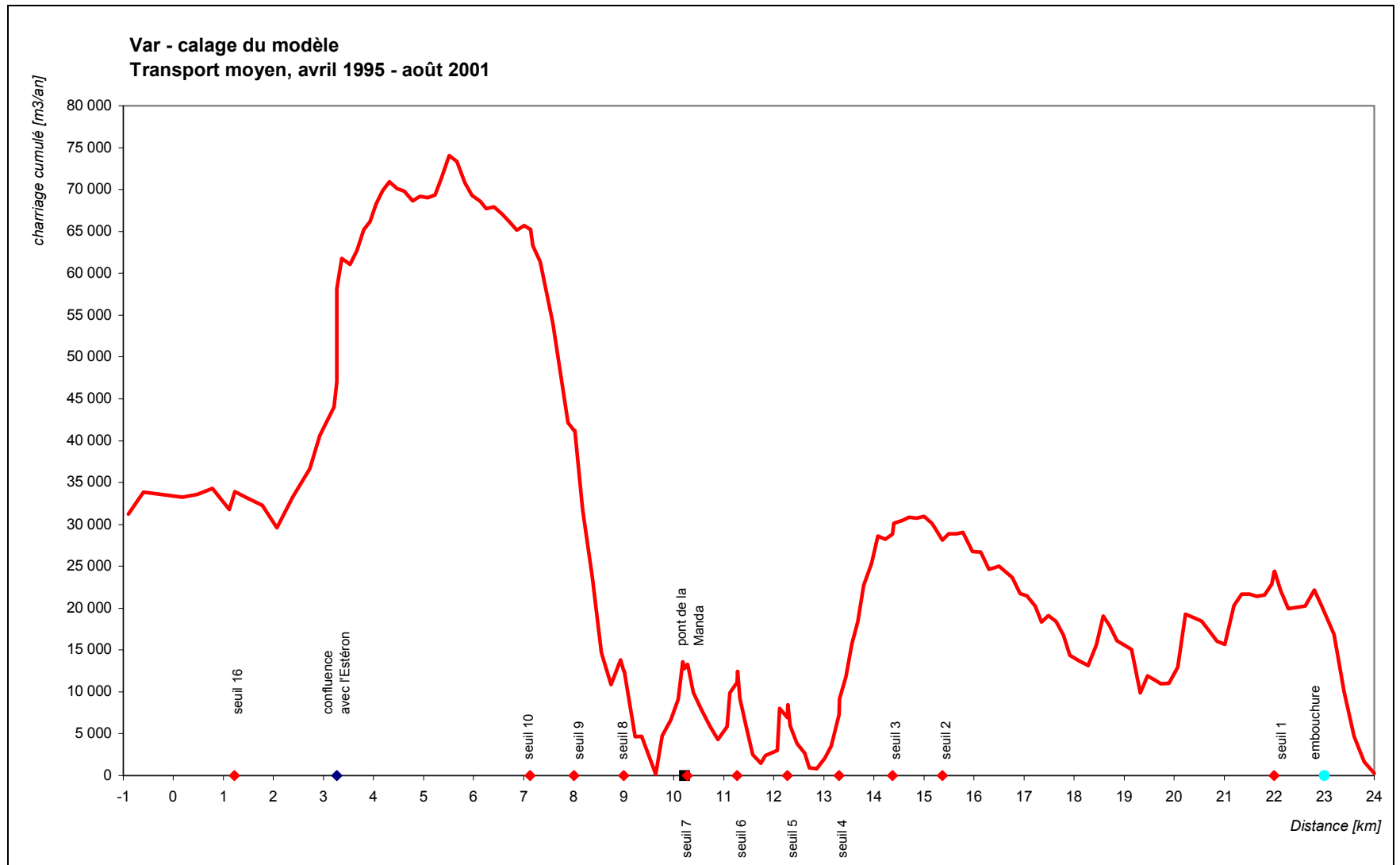
On retrouve sur ce graphique l'apport amont et celui de l'Estéron, qui résultent en un accroissement local du volume transporté. Sur les autres tronçons, une courbe fortement décroissante représente une tendance au dépôt, une courbe croissante une tendance à l'érosion. En état d'équilibre, donc sans changement de la cote du fond, la courbe serait légèrement décroissante, elle dévie en effet de l'horizontale en fonction de l'abrasion.

Cette figure est particulièrement intéressante puisqu'elle indique les contributions relatives des apports et de l'érosion du fond au transport dans les tronçons. On remarquera ainsi le niveau du transport en amont du seuil 10 dépassant 70 000 m<sup>3</sup>/an, comparé à l'apport cumulé du Var et de l'Estéron de l'ordre de 42 000 m<sup>3</sup>/an. 40% du transport au seuil 10 proviendrait donc de l'érosion du tronçon entre la confluence avec la Vésubie jusqu'à ce seuil. Evidemment, on retrouve l'interruption du transport en aval du seuil 8 et la reprise en aval du seuil 4, par érosion. Les quelques oscillations entre ces deux seuils sont dues à la représentation simplifiée de la granulométrie entre les seuils. On notera encore que le niveau de transport en aval du seuil 4 reste nettement inférieur aux apports amont.

L'apport de l'Estéron de l'ordre de 10 000 m<sup>3</sup>/an, qui provient d'une estimation antérieure, est confirmé.

L'apport du Var, avec 31 000 m<sup>3</sup>/an, reste inférieur à de plus anciennes estimations. De nouvelles données ont permis de constater tout d'abord que l'hydrologie du Var avait été sur-estimée, notamment en ce qui concerne les périodes de crue. Cela avait entraîné une sur-estimation du charriage annuel arrivant dans la basse vallée. De plus, les estimations précédentes de ce charriage étaient basées sur les pentes « naturelles » du Var (avant les extractions) qui étaient d'environ 5,6‰. Or le profil en long tiré du levé photogramétrique montre qu'à l'amont du seuil 16, la pente est très faible, de l'ordre de 4,9 ‰. La combinaison de ces deux éléments, pente amont faible et hydrologie moins forte, conduisent à une estimation du charriage annuel à l'entrée de la basse vallée de l'ordre de 30 000 m<sup>3</sup>/an à 35 000 m<sup>3</sup>/an.

La période simulée pour ce calage, d'avril 1995 à août 2001, est une période d'hydrologie assez forte. Le transport a donc été intense sur le Var et des variations importantes des fonds sont intervenues. Ces conditions ont permis un bon calage du modèle.



## 2.3. EVOLUTION PREVISIBLE DANS LA SITUATION ACTUELLE

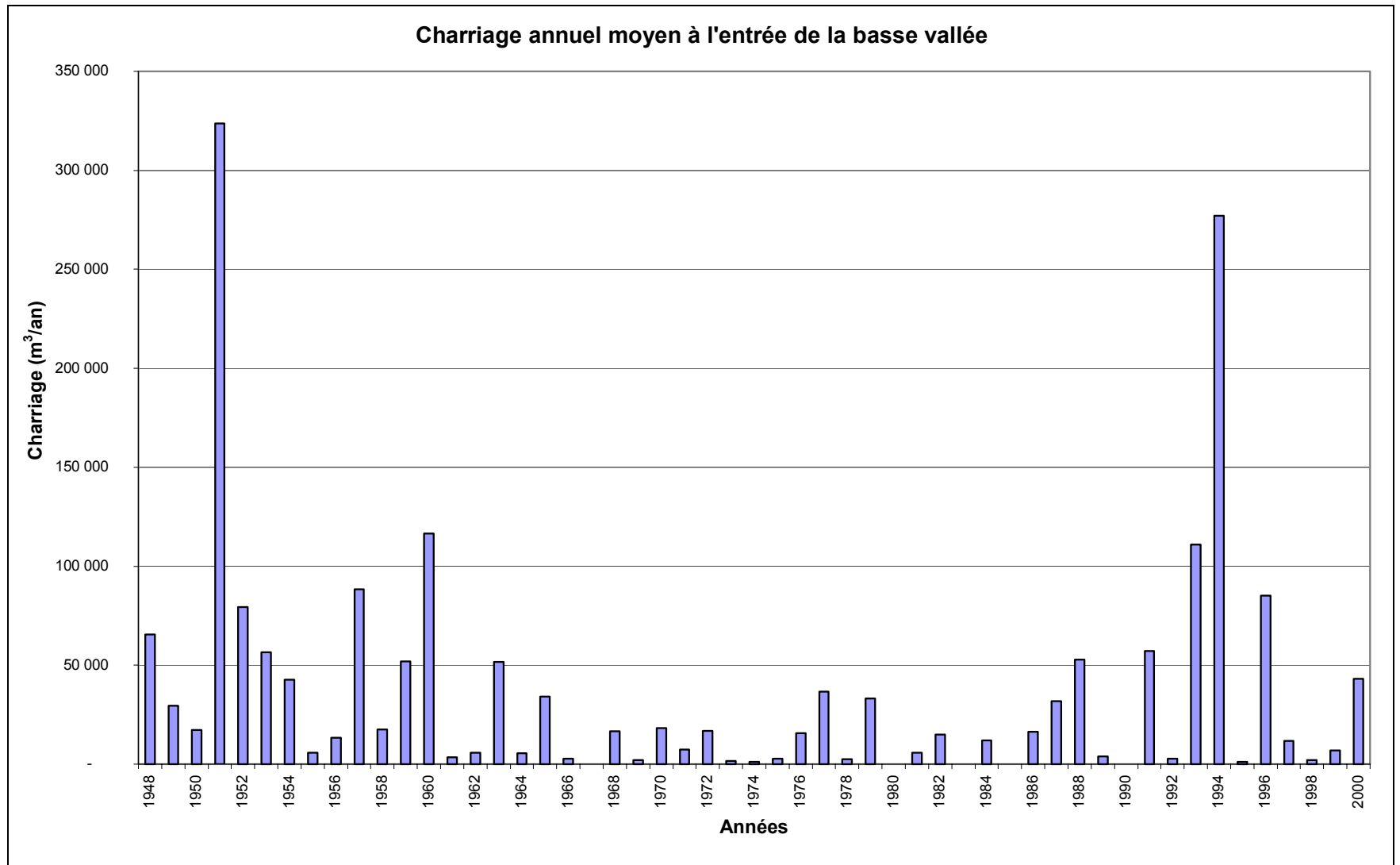
### 2.3.1. HYDROLOGIE

Les résultats des simulations sont très variables suivant l'hydrologie utilisée. La définition d'une hydrologie moyenne, identique chaque année, n'est pas acceptable car elle ne correspond pas au transport solide moyen. La meilleure solution est d'utiliser l'hydrologie connue (de 1948 à 2001) est de supposer qu'elle va se reproduire. Cette hypothèse est bien sûr fautive mais la période disponible (53 ans) est suffisamment longue pour avoir une assez bonne vision du profil en long du Var dans plusieurs décennies. De plus cela permet d'appréhender la variation de vitesse de remplissage des biefs. L'hydrologie simulée est donc identique à celle mesurée de 1948 à 2001. Ces 53 années peuvent être découpées en 3 périodes distinctes :

- 1948 à 1965 : hydrologie très forte (apport amont moyen d'environ 50 000 m<sup>3</sup>/an sur la période)
- 1966 à 1983 : hydrologie très faible (apport amont moyen d'environ 10 000 m<sup>3</sup>/an sur la période)
- 1984 à 2001 : hydrologie forte (apport amont moyen d'environ 45 000 m<sup>3</sup>/an sur la période)

Les valeurs de charriage annuel moyen sont faibles car elles sont basées sur l'état du lit en 2002 et non sur l'état naturel du lit. Il est clair que le transport solide entrant dans la basse vallée durant la période 1948 à 1965 a été beaucoup plus important que 30 000 m<sup>3</sup>/an. En effet, la pente à l'amont immédiat de la basse vallée était à l'époque de l'ordre de 5,6‰. Mais pour la simulation, c'est la pente de l'état 2002 qui a été considérée, à savoir environ 4,9‰. Il est vraisemblable qu'avec le remplissage progressif des souilles à l'amont de la basse vallée, cette pente augmente au cours du temps. Toutefois, il n'est pas possible aujourd'hui d'estimer la dynamique d'augmentation de cette pente. Pour se placer dans un cas sécuritaire, en sous-estimant l'apport amont, il est préférable de prendre en compte la pente 2002 pour l'ensemble de la période simulée.

Le tableau suivant montre la très forte variabilité du charriage au cours des années 1948 à 2000 (les valeurs de charriage sont issues de la modélisation avec comme hypothèse la pente amont faible de 4,9‰).



Cette très forte variabilité de l'hydrologie rend difficile l'estimation de la durée de remplissage d'un bief. En effet, le volume de matériaux nécessaire au remplissage d'un bief a été estimé à 400 000 m<sup>3</sup> environ (confère 2.2.2). Ce volume peut être apporté en moins de 4 ans si l'hydrologie des années 1951 à 1954 se reproduit. Par contre l'ensemble des 20 années de 1966 à 1986 ne suffisent pas à apporter ce volume.

Les apports solides moyens du Var amont et de l'Estéron, sur l'ensemble des 54 années modélisées correspondent à environ 2 300 000 m<sup>3</sup> de matériaux. Les matériaux qui quittent la basse vallée à l'embouchure (10 000 m<sup>3</sup>/an environ en moyenne) proviennent de l'érosion des fonds à l'aval du seuil 4. Le volume de matériaux déposés dans les biefs pendant la période simulée est donc d'environ 2 300 000 m<sup>3</sup>. Cela permet à peine (les résultats de la simulation le confirment) de remplir les 5 biefs depuis le seuil 9 jusqu'au seuil 4. En effet, le volume de matériaux nécessaire au remplissage d'un bief étant d'environ 400 000 m<sup>3</sup>, le remplissage des 5 biefs du seuil 9 au seuil 4 nécessite environ 2 000 000 m<sup>3</sup> de matériaux.

Si l'hydrologie moyenne de l'ensemble de la période avait été identique aux années 1948 à 1965 (apport moyen du Var amont d'environ 50 000 m<sup>3</sup>/an), le même résultat serait obtenu en 40 ans.

Si l'hydrologie moyenne de l'ensemble de la période avait été identique aux années 1966 à 1983 (apport moyen du Var amont d'environ 10 000 m<sup>3</sup>/an), il faudrait alors attendre environ 115 ans pour que les matériaux atteignent le seuil 4.

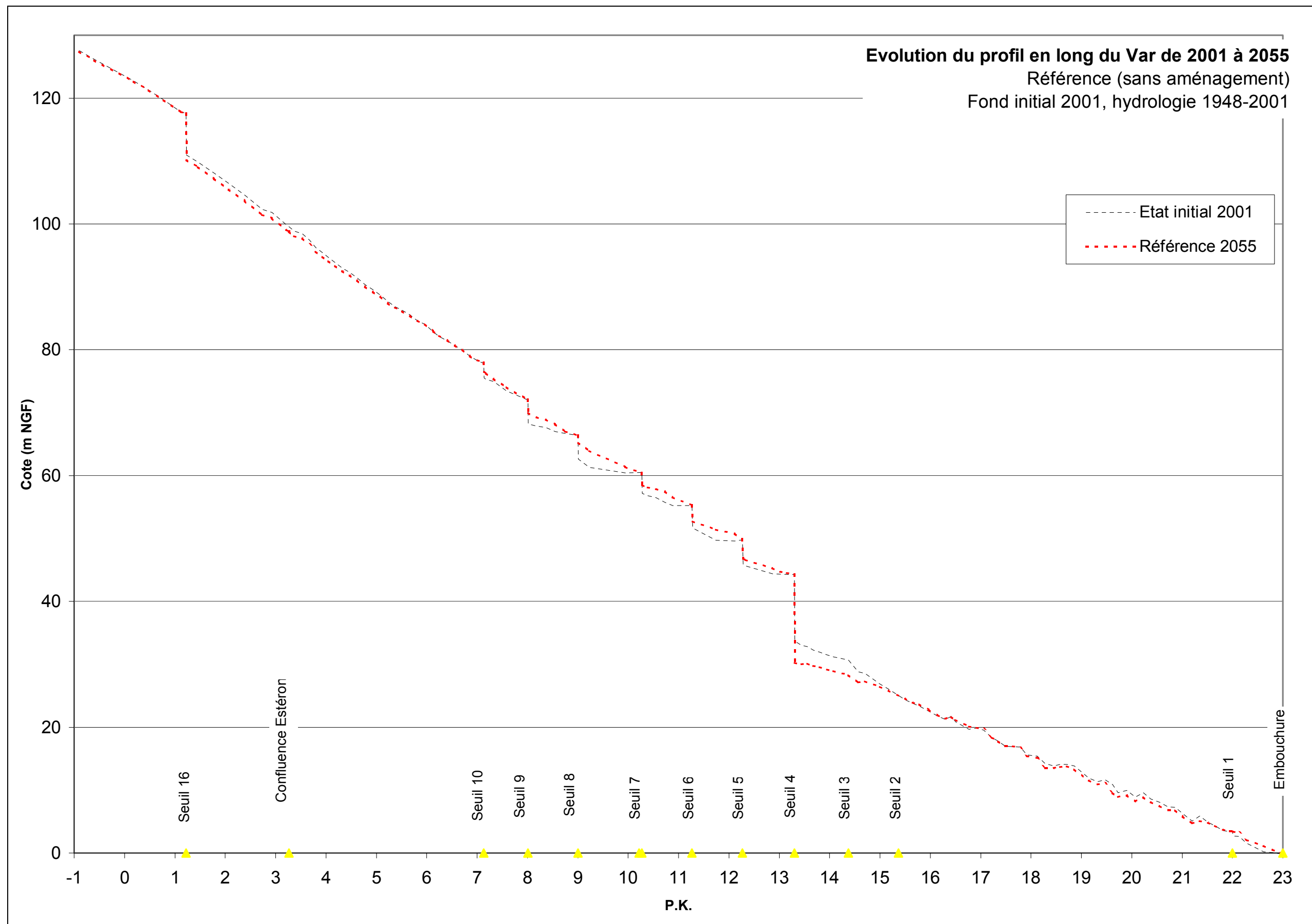
### **2.3.2. SIMULATION DE REFERENCE**

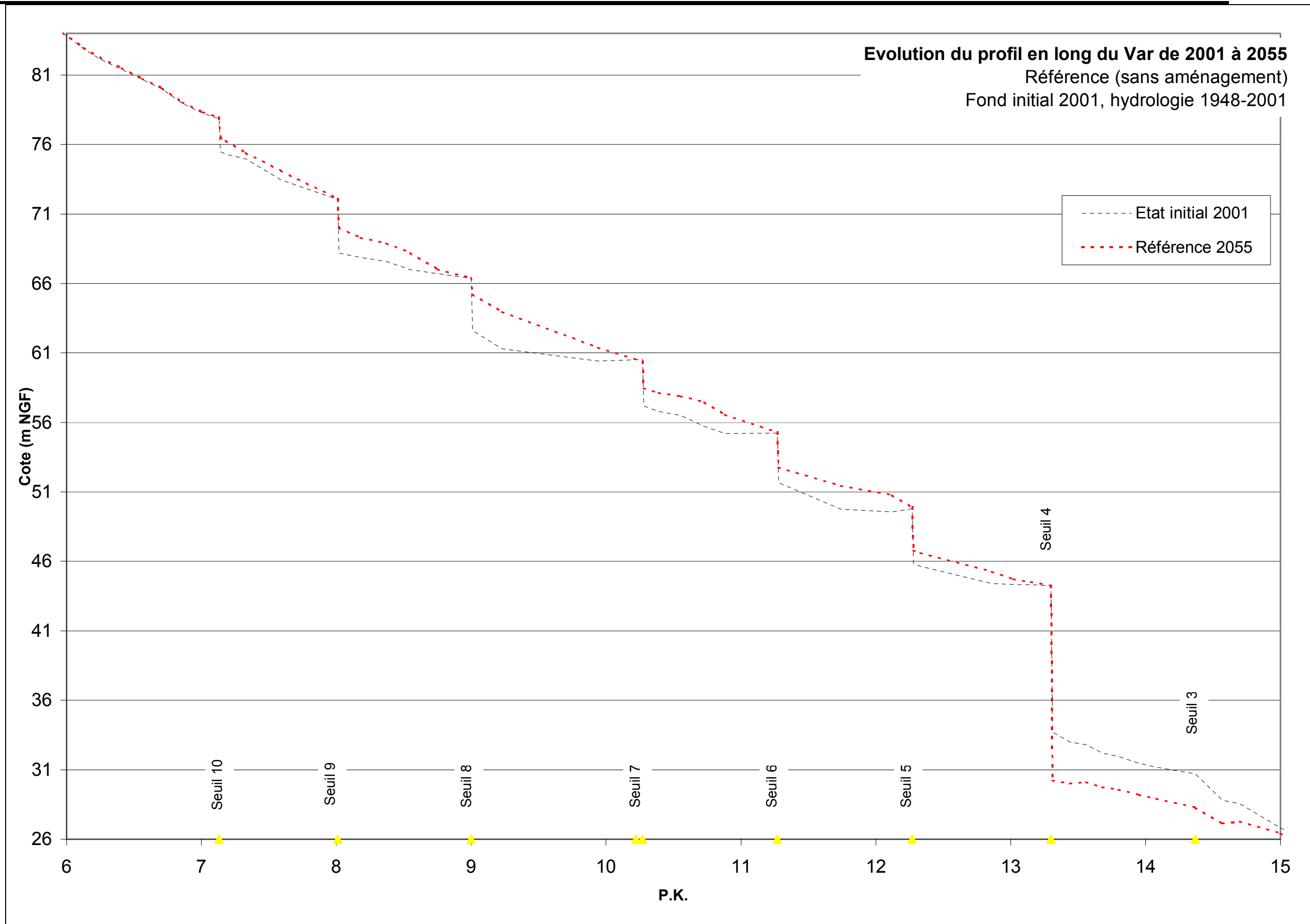
Pour définir une référence, pour pouvoir évaluer l'impact des différents aménagements, une simulation a été réalisée en supposant qu'aucun aménagement ne soit réalisé sur le Var pendant toute la période simulée.

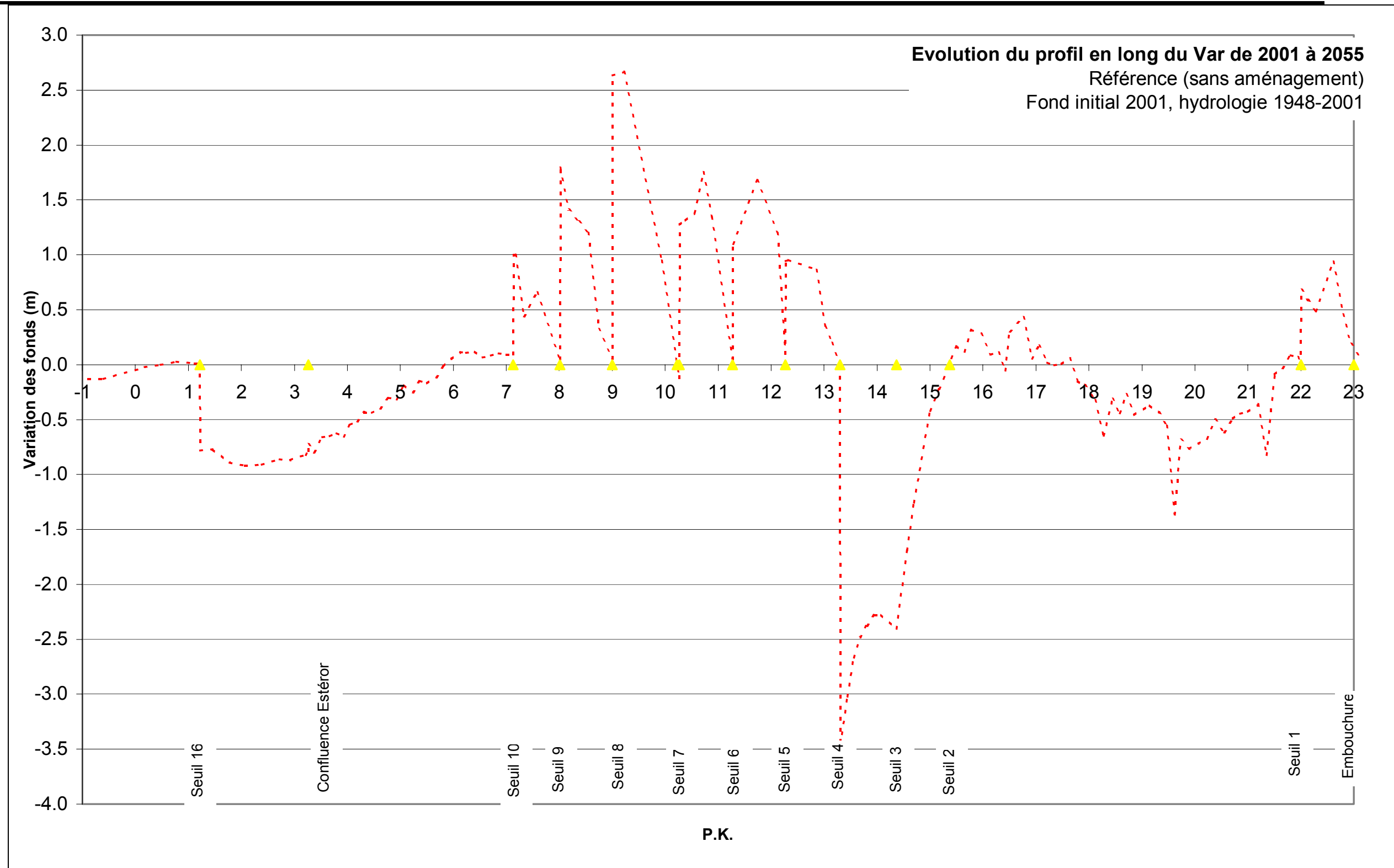
Pour cette simulation, les moignons et les palplanches des seuils 2 et 3 n'ont pas été considérés comme fixes. Par contre les autres aménagements sont supposés rester en place, même si les chutes à l'aval de certains ouvrages deviennent inacceptables au cours de la simulation.

Le fond initial considéré est le fond 2001. L'hydrologie correspond à l'hydrologie historique de 1948 à 2001. Le profil obtenu à la fin de cette simulation correspondrait donc au profil du Var en 2055, en supposant qu'aucun aménagement ne soit réalisé, qu'aucun ouvrage ne soit déstabilisé, que l'hydrologie des 54 prochaines années soit équivalente à celle des 54 dernières années et que les conditions aux limites soient inchangées (apports du Var amont et de l'Estéron).

Les 2 premiers graphiques ci-après présentent le profil en long du Var au bout de ces 54 ans de simulation, par rapport au profil initial de 2001. Le 3<sup>ème</sup> graphique montre la variation des fonds.





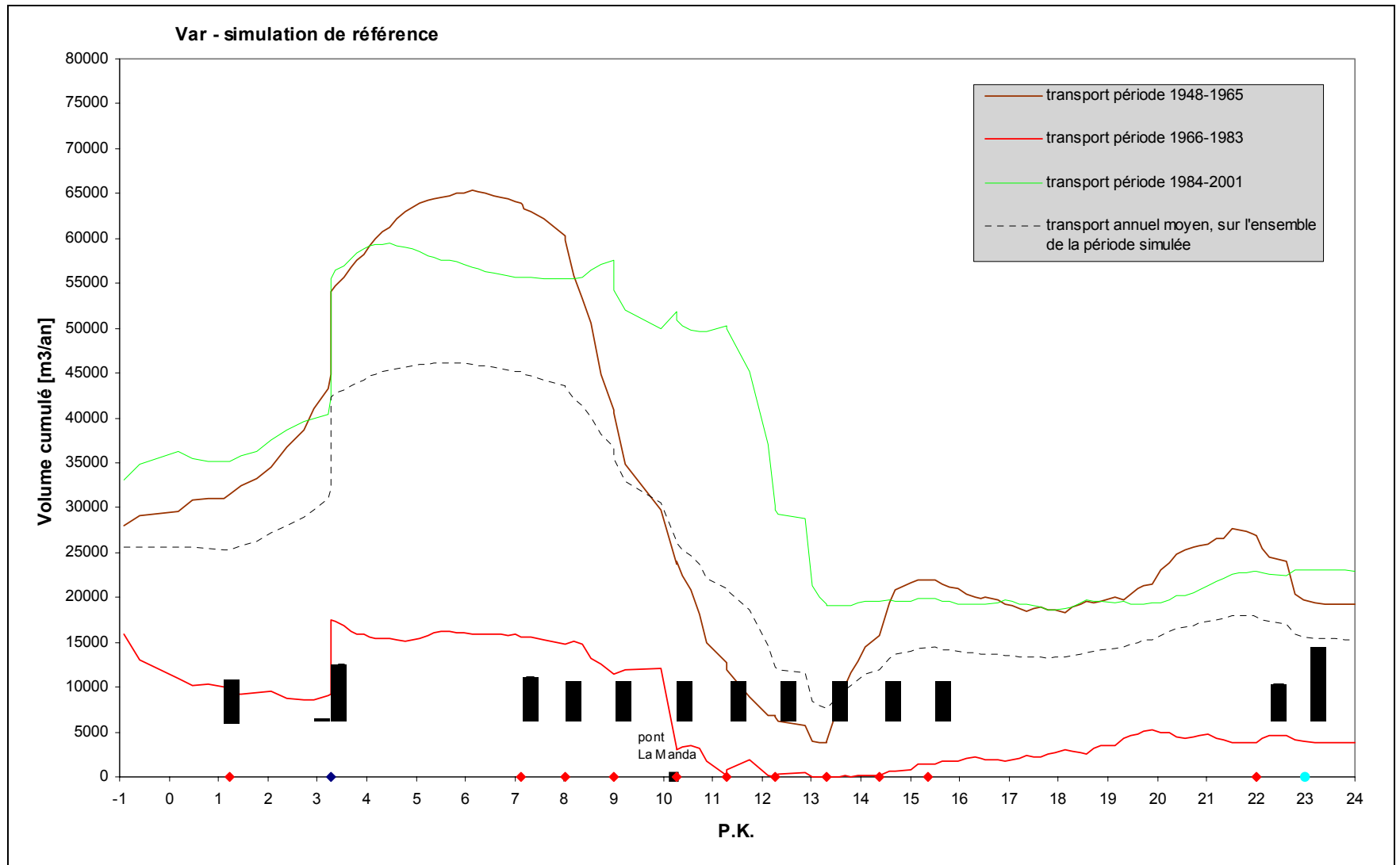


Les résultats de cette simulation montrent que les matériaux ne parviennent pas encore, au terme des 54 années, à l'aval du seuil 4. Le bief entre les seuils 5 et 4 commencent à peine à se remplir (cela confirme les bilans de volume charrié présentés au 2.3.1). Les biefs 7-6 et 6-5 ne sont pas complètement comblés.

On note un abaissement de 1 m des fonds à l'aval du seuil 16 par rapport à la situation 2001, mettant en péril la résistance de l'ouvrage déjà fortement sollicité. Les fonds à l'aval du seuil n°4 s'abaisseraient quant à eux de 3.5 m par rapport à l'état 2001. Bien sûr, cela est purement hypothétique puisque l'ouvrage dans son état actuel n'est pas capable de résister à un tel abaissement. Mais cette valeur d'abaissement des fonds permet de dimensionner un éventuel contre-seuil.

La figure ci-dessous documente à nouveau les tendances par l'évolution des volumes cumulés. La moyenne transportée par an est reproduite pour les trois périodes citées sous 2.3.1, ainsi que la moyenne annuelle, prise sur l'ensemble de la période. On remarque à nouveau la forte influence de l'hydrologie, puisque la période centrale transporte des volumes nettement inférieurs par rapport aux deux autres. D'autre part, on peut remarquer une évolution du charriage dans le temps. Ainsi, pendant la première période, le remplissage de biefs se fait surtout en amont des seuils 7 et 8, alors que pendant la troisième période le remplissage est surtout concentré à l'aval du seuil 5 et en partie à l'aval du seuil 4. L'érosion au pied du seuil 4 progresse surtout pendant la première période, alors que par la suite il n'y aurait plus d'abaissement ultérieur (évidemment toujours sous la condition fictive que le seuil 4 ait pu résister à cette sollicitation).

Cette simulation de référence permettra dans la suite de l'étude de comparer les avantages et inconvénients des différents aménagements.



## 2.4. SOLUTIONS D'AMENAGEMENT

Les solutions d'aménagement envisagent l'abaissement de plusieurs seuils. Nous avons donc analysé l'impact de l'abaissement d'un seuil sur le bief amont.

### 2.4.1. ANALYSE DU PHENOMENE D'ABAISSMENT D'UN SEUIL

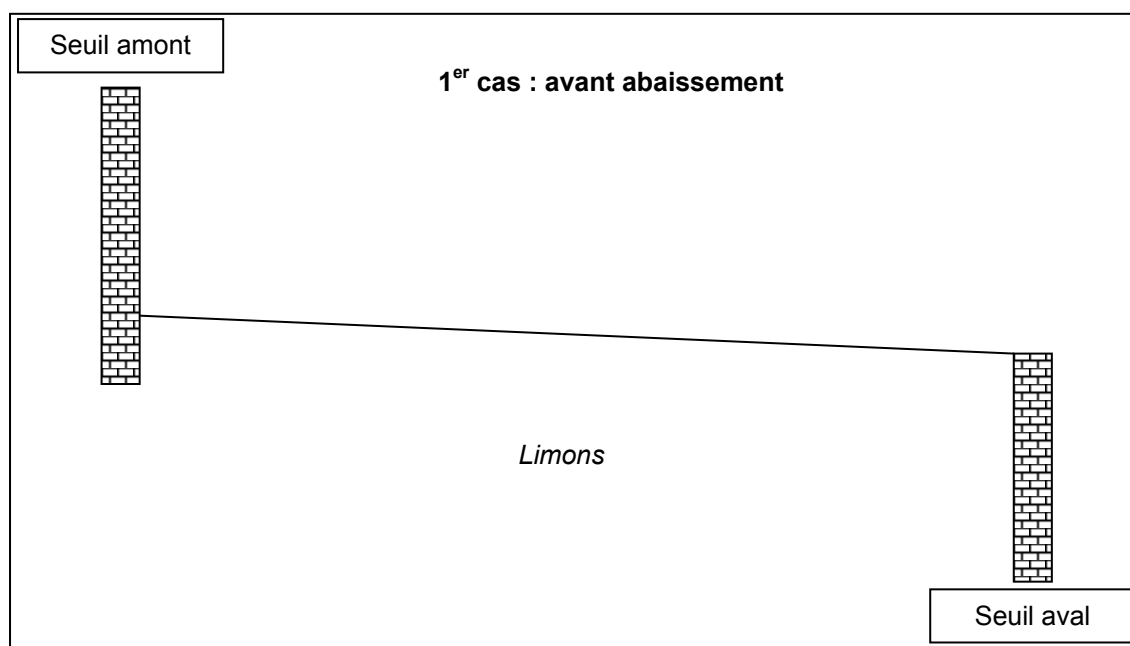
Il convient de définir quel est le moment le plus judicieux pour l'abaissement d'un seuil, dans le but de :

- Limiter le volume de matériaux nécessaires au remplissage du bief, pour accélérer l'avancement de la langue de matériaux
- Limiter l'érosion des fonds à l'amont du seuil abaissé, en phase transitoire, pour limiter les travaux de renforcement des digues et des éventuels ouvrages de franchissement
- Limiter la hauteur de chute sur le seuil amont en phase transitoire, pour éviter des travaux de confortement importants

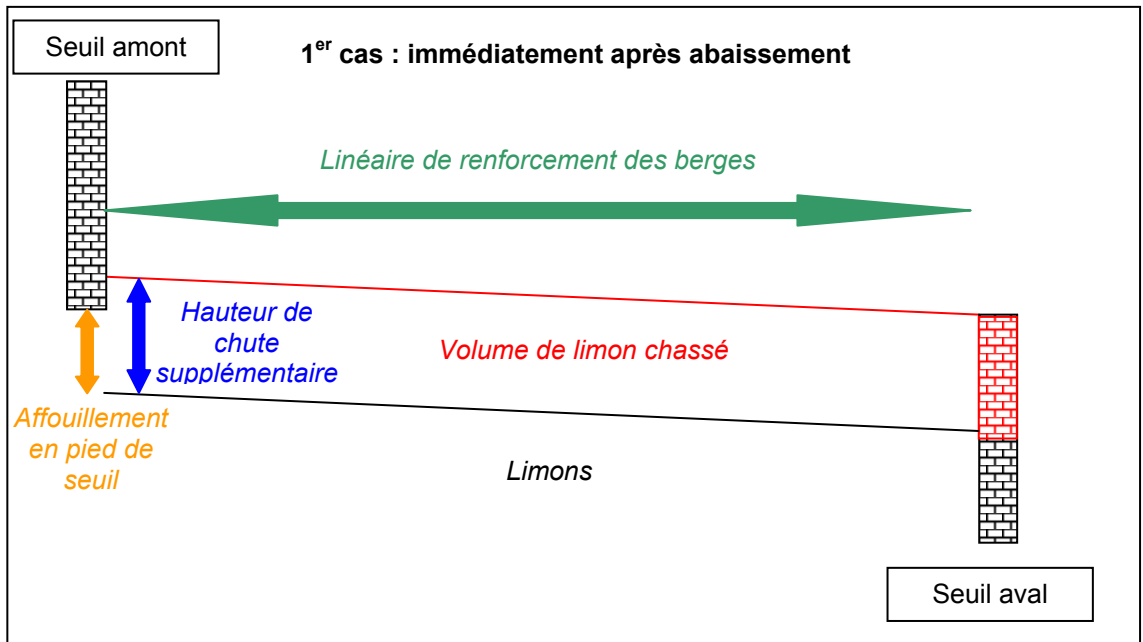
Pour bien comprendre le phénomène d'abaissement d'un seuil et ses conséquences, 2 cas extrêmes sont analysés ci-après :

- 1<sup>er</sup> cas : Abaissement du seuil aval alors que les matériaux ne sont pas encore parvenus dans le bief
- 2<sup>ème</sup> cas : Abaissement du seuil aval lorsque les matériaux sont à l'amont immédiat de ce seuil

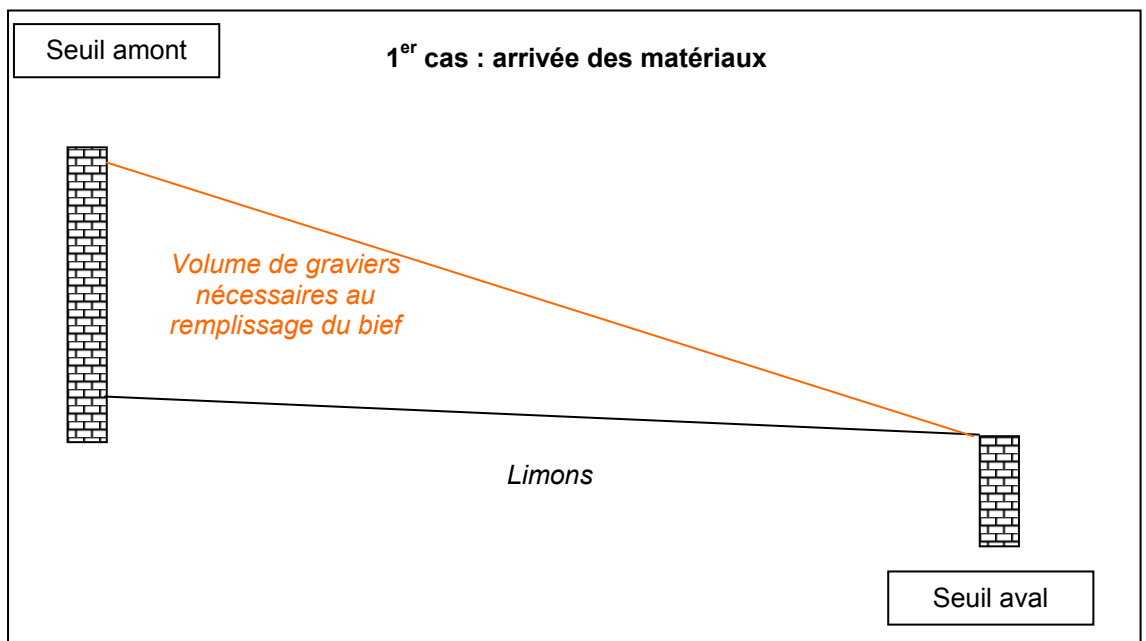
#### 2.4.1.1. 1<sup>ER</sup> CAS



La pente de la phase limoneuse s'établit à 1‰ à 1.5‰.

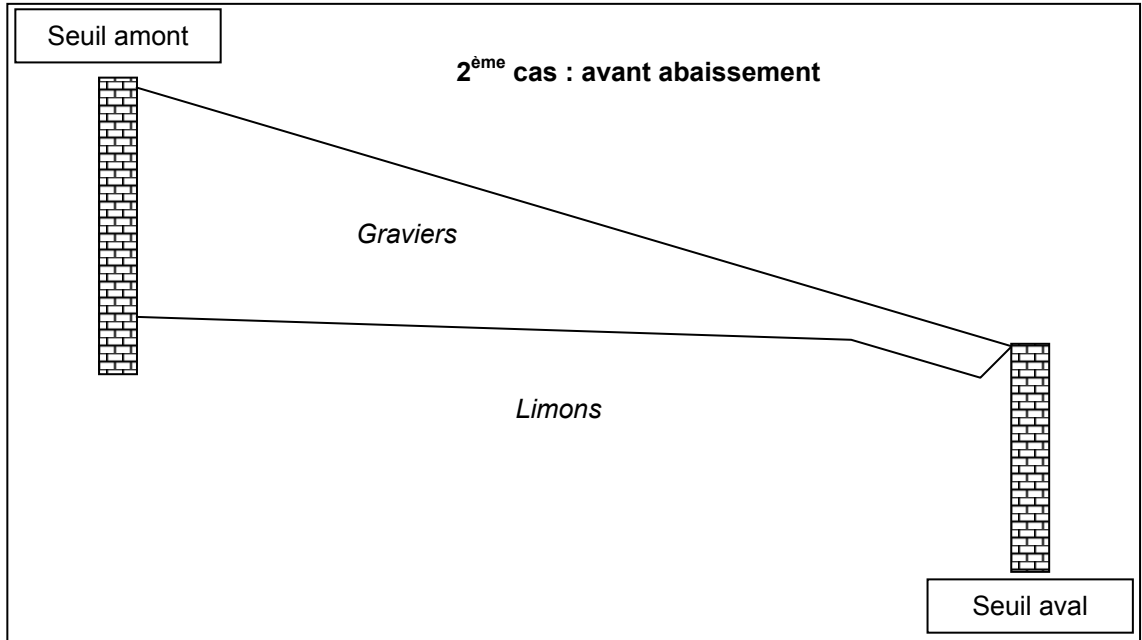


Immédiatement après l'abaissement du seuil aval, le limon est chassé dans tout le bief pour retrouver sa pente d'équilibre à 1‰ à 1.5‰. La hauteur de chute supplémentaire à l'aval du seuil amont est donc égale à la valeur de l'abaissement du seuil aval, il est donc indispensable de protéger le seuil amont. La hauteur de renforcement des berges est également égale à la valeur de l'abaissement du seuil et ce sur tout le linéaire depuis le seuil amont jusqu'au seuil aval.

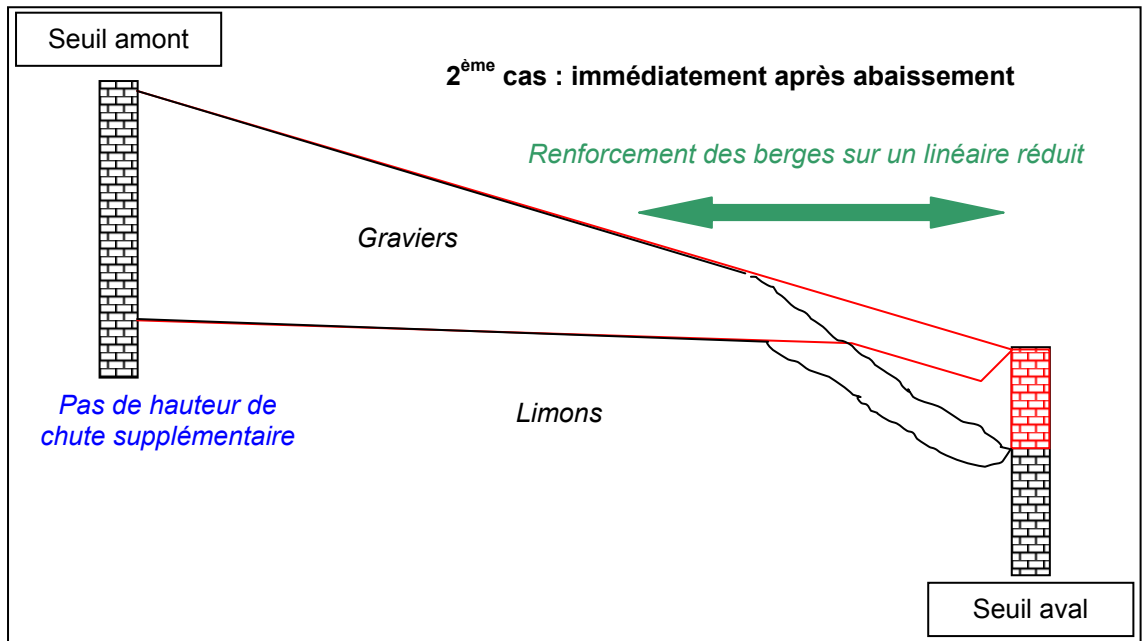


Lorsque les matériaux parviennent dans le bief, ils doivent le remplir jusqu'à obtenir la pente d'équilibre de 4.5‰ à 5‰.

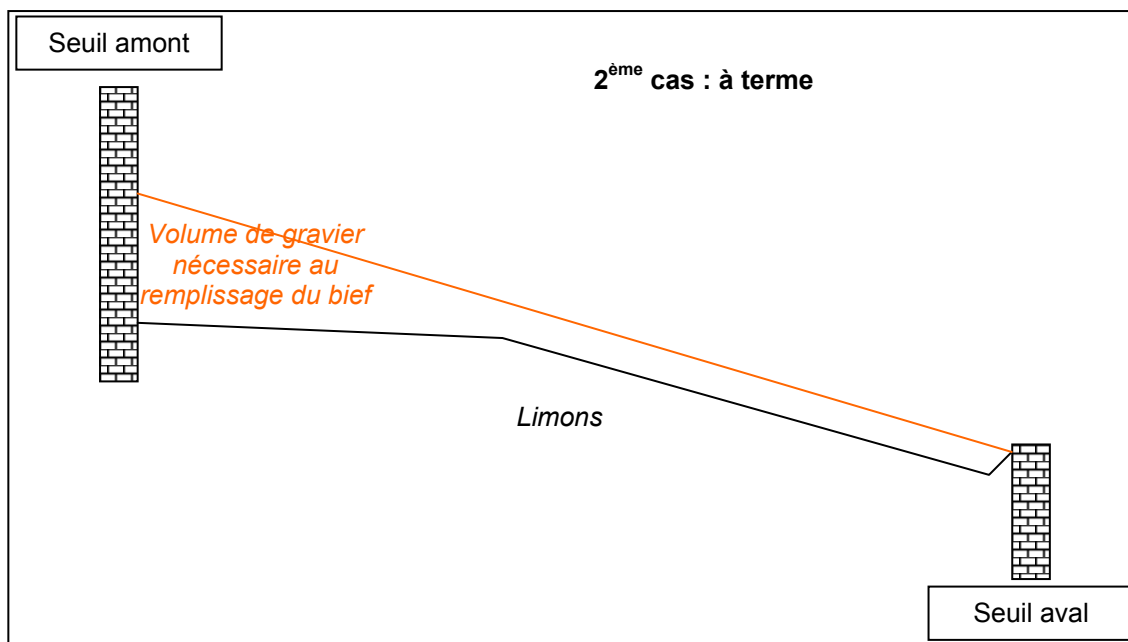
2.4.1.2. 2EME CAS



La pente de la phase limoneuse s'établit à 1‰ à 1.5‰, celle des graviers à 4.5‰ à 5‰. On note la présence des graviers à l'amont immédiat du seuil aval jusqu'à 0.50 m de profondeur (confère 2.2.2).



Immédiatement après abaissement du seuil aval, un phénomène d'érosion régressive fait se déposer les graviers au fur et à mesure que le limon est chassé à l'amont immédiat du seuil. Lorsque la couche de gravier aura atteint une épaisseur d'environ 0.50 m, elle formera une couche protectrice au-dessus du limon, empêchant ce dernier d'être chassé à l'aval. Le linéaire de renforcement des berges est plus restreint que dans le cas précédent. Il n'y a pas de hauteur de chute supplémentaire à l'aval du seuil amont.



A terme, le volume de gravier nécessaire au remplissage du bief est plus faible que dans le cas précédent.

L'analyse de ces deux cas extrêmes montre qu'il est judicieux d'attendre que la langue de matériaux soit parvenue à l'amont immédiat d'un seuil avant de l'abaisser. Toutefois, pour certains biefs présentant des risques d'inondation importants, il sera tout à fait possible d'abaisser le seuil aval avant que les matériaux n'aient totalement rempli le bief entraînant la rehausse de la ligne d'eau. Les travaux de renforcement des berges et du seuil amont seront simplement plus importants.

## 2.4.2. MODELISATION DE L'ABAISSMENT D'UN SEUIL GRACE AU LOGICIEL MORMO

Théoriquement, on peut préparer les données granulométriques du fond existant pour le logiciel MORMO de telle manière que l'historique avec le dépôt de sédiment de granulométrie variable soit respecté. Mais ce n'est possible que si les limites de couches se trouvent plus ou moins sur une horizontale. Les biefs limoneux du Var sont par contre caractérisés par un chenal profond relativement étroit et un lit majeur plus élevé. Pour tenir compte du processus décrit au paragraphe précédent, il faudrait en outre faire varier le comportement des limons en fonction de la force tractrice (matériaux restent en place si le front de gravier avance, mais sont éliminés en fonction d'une forte pente due à l'abaissement de seuil).

Nous avons donc renoncé à représenter le sous-jacent limoneux du Var. Les limons sont remplacés en modèle par du gravier identique à celui de la langue. Si une souille n'est pas complètement remplie de matériaux, au moment de l'abaissement du seuil aval, c'est donc un certain volume de matériaux grossiers qui est évacué et non un volume de limon. Ce volume de

matériaux participe alors au remplissage de la souille aval. D'autre part, l'érosion régressive dans la souille amont est probablement un peu moins étendue.

Par contre, si la souille est remplie, les nouveaux graviers se déposent sur l'ancien fond qui ne bouge pas (cas n°2 présenté dans le paragraphe précédent). L'érosion régressive va enlever plus tard une partie de ces dépôts frais, mais ne va pas éroder jusqu'à l'ancien fond. Dans ce cas, la composition admise pour le sous-jacent n'a pas d'influence sur les résultats. Il convenait toutefois de contrôler que l'évolution obtenue à partir du modèle était bien celle que l'on vient de décrire.

### **2.4.3. DESCRIPTION DES SCENARIOS**

#### **2.4.3.1. SCENARIO GLOBAL**

Un scénario global d'aménagement a été simulé en utilisant la même hydrologie que pour la simulation de référence à savoir l'hydrologie constatée sur le Var des années 1948 à 2001. Les aménagements envisagés sur le Var ont pour objectifs principaux :

- Accélérer le retour du transport solide à l'aval du seuil n°4
- Limiter le risque inondation
- Limiter l'impact hydraulique sur les ouvrages (seuils et berges)
- Limiter l'impact sur la nappe dans sa zone de réalimentation (amont du seuil 10)

Les aménagements retenus pour la simulation sont les suivants :

- Abaissements successifs des seuils 10 à 4 lorsque les souilles sont comblées
- Suppression des micro-centrales au moment de l'abaissement du seuil correspondant
- Maintien des seuils 2 et 3 à leur état 2002
- Pavage artificiel à l'aval du seuil 16 sur 200 m de long et sur toute la largeur du lit
- Abaissement du seuil n°1 de 0.50 m

Le maintien des seuils 2 et 3 consiste à considérer que les palplanches de ces seuils ruinés, encore en place aujourd'hui, maintiennent les terres à l'amont. Cette hypothèse a de grandes conséquences sur l'évolution des fonds à l'aval du seuil n°4.

Dans la simulation, l'abaissement d'un seuil n'a été réalisé que lorsque les matériaux arrivaient à l'amont du seuil correspondant pour limiter le volume de limons chassés et accélérer au maximum le retour des matériaux dans la basse vallée. La dynamique des aménagements a donc été la suivante :

	<b>Temps</b>	<b>Aménagements</b>
<b>1</b>	Au début de la simulation	Suppression de la micro-centrale du seuil 10 qui est engravée
		Maintien des seuils 2 et 3 dans leur état 2002 (moignons et palplanches)
		Pavage artificiel à l'aval du seuil 16 sur 200 m de long
		Abaissement du seuil 9 et suppression de sa micro-centrale
		Abaissement du seuil 1
<b>2</b>	Lorsque les matériaux parviennent au seuil 8	Abaissement du seuil 8 et suppression de sa micro-centrale
		Abaissement du seuil 10
<b>3</b>	Lorsque les matériaux parviennent au seuil 7	Abaissement du seuil 7 et suppression de sa micro-centrale
<b>4</b>	Lorsque les matériaux parviennent au seuil 6	Abaissement du seuil 6 et suppression de sa micro-centrale
<b>5</b>	Lorsque les matériaux parviennent au seuil 5	Abaissement du seuil 5 et suppression de sa micro-centrale
<b>6</b>	Lorsque les matériaux parviennent au seuil 4	Abaissement du seuil 4 et suppression de sa micro-centrale

Les cotes d'abaissement des seuils ont été définies pour obtenir un bon compromis des objectifs suivants :

- Accélération de l'avancement des matériaux
- Diminution du risque inondation, notamment à l'amont du seuil 10 et entre les seuils 7 et 5 : le critère retenu a été de maintenir, pour la crue centennale, le niveau d'eau sous le terrain naturel aussi bien en rive gauche qu'en rive droite
- Limitation de l'impact sur les aménagements tels ponts et berges

Les cotes d'abaissement retenues ont donc été les suivantes :

<b>Seuil</b>	<b>Abaissement</b>
10	1.50
9	2.11
8	1.50
7	1.93
6	3.01
5	3.04
4	3.34
1	0.50

Il est à noter que ces cotes d'abaissement devront être ajustées à la suite d'études de faisabilité technique d'abaissement de ces seuils (spécifiques à chaque seuil en fonction de leur conception d'origine).

Dans la simulation les micro-centrales ont été supprimées en même temps que le seuil correspondant était abaissé. En fait, il s'agit de la suppression des superstructures placée sur

les seuils actuels ainsi que les voies d'accès aux micro-centrales. Une intégration des micro-centrales dans la structure des seuils au moment de leur abaissement permettrait peut être la poursuite de l'activité de production électrique.

Les fonds initiaux correspondent aux fonds 2001. La première partie de la simulation utilise l'hydrologie des 54 années connues (de 1948 à 2001). Le profil obtenu correspondrait donc au profil du Var en 2055, si les aménagements réalisés sont identiques à ceux de la modélisation, en supposant une hydrologie équivalente et des apports du Var amont et de l'Estéron équivalents. Pour estimer l'allure du profil en long à plus long terme, une deuxième période de 54 ans a été simulée avec les mêmes conditions. Le profil en long obtenu correspondrait donc au profil en long du Var en 2109 en supposant des conditions identiques. Pour quelques tronçons, les profils en long intermédiaires ont été ajoutés aux graphiques afin de se rendre compte de l'évolution de la zone à court et moyen terme.

Au cours de la simulation, l'avancement de la langue de matériaux a été suivie afin de réaliser les abaissements de seuil aux moments opportuns (à l'arrivée des matériaux). Le tableau ci-après récapitule les différents temps d'abaissement des seuils au cours de la simulation du scénario global :

Scénario global - Abaissement des seuils	
Seuil 9	immédiat
Seuil 8 et 10	après 3 ans
Seuil 7	après 3 ans et 6 mois
Seuil 6	après 11 ans
Seuil 5	après 11 ans et 6 mois
Seuil 4	après 47 ans
<b>Dépend très fortement de l'hydrologie</b>	

Le temps nécessaire au remplissage d'un bief est donc très variable :

- Bief à l'amont du seuil 7 : 3 ans et 6 mois
- Bief à l'amont du seuil 4 : 47 ans

Toutefois la vitesse de remplissage est très dépendante de l'hydrologie (confère 2.3.1). Le remplissage du bief à l'amont du seuil 7 correspond à une période de très forte hydrologie (années 1951 à 1954). La période de très faible hydrologie (de 1961 à 1992) correspond à l'inverse au remplissage en partie du bief à l'amont du seuil 4.

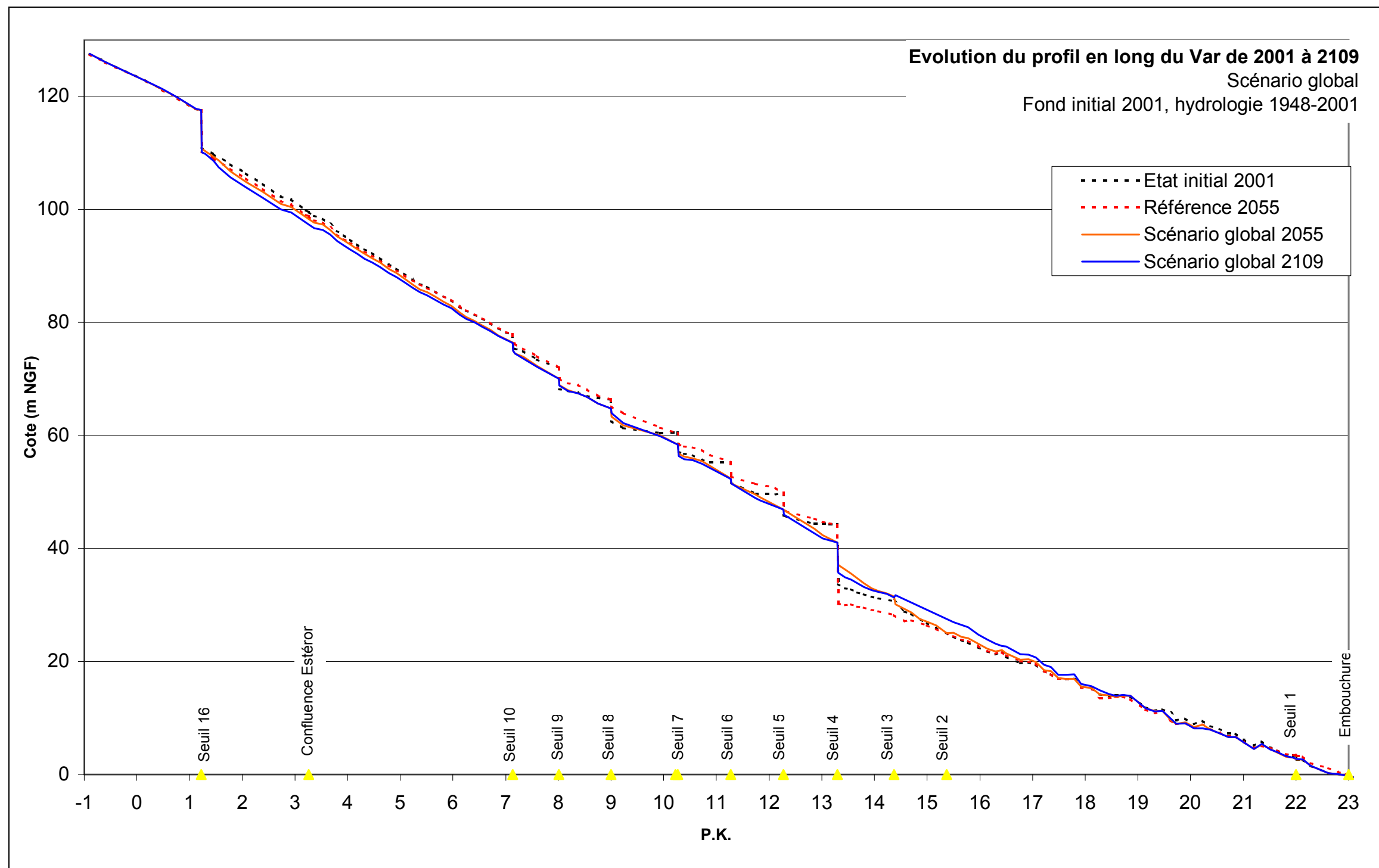
De plus, l'abaissement concomitant des seuils 8 et 10, crée un apport très important de matériaux vers l'aval (estimé à 800 000 m<sup>3</sup> environ en 10 ans). Cela a participé au remplissage rapide du bief à l'amont du seuil 7, d'autant plus que dans la simulation, les années postérieures à l'abaissement du seuil 10 (1951) avaient une forte hydrologie. Il serait peut être judicieux de décaler l'abaissement de ces deux seuils dans la réalité afin de ne pas risquer de dégager une trop grande quantité de matériaux trop rapidement.

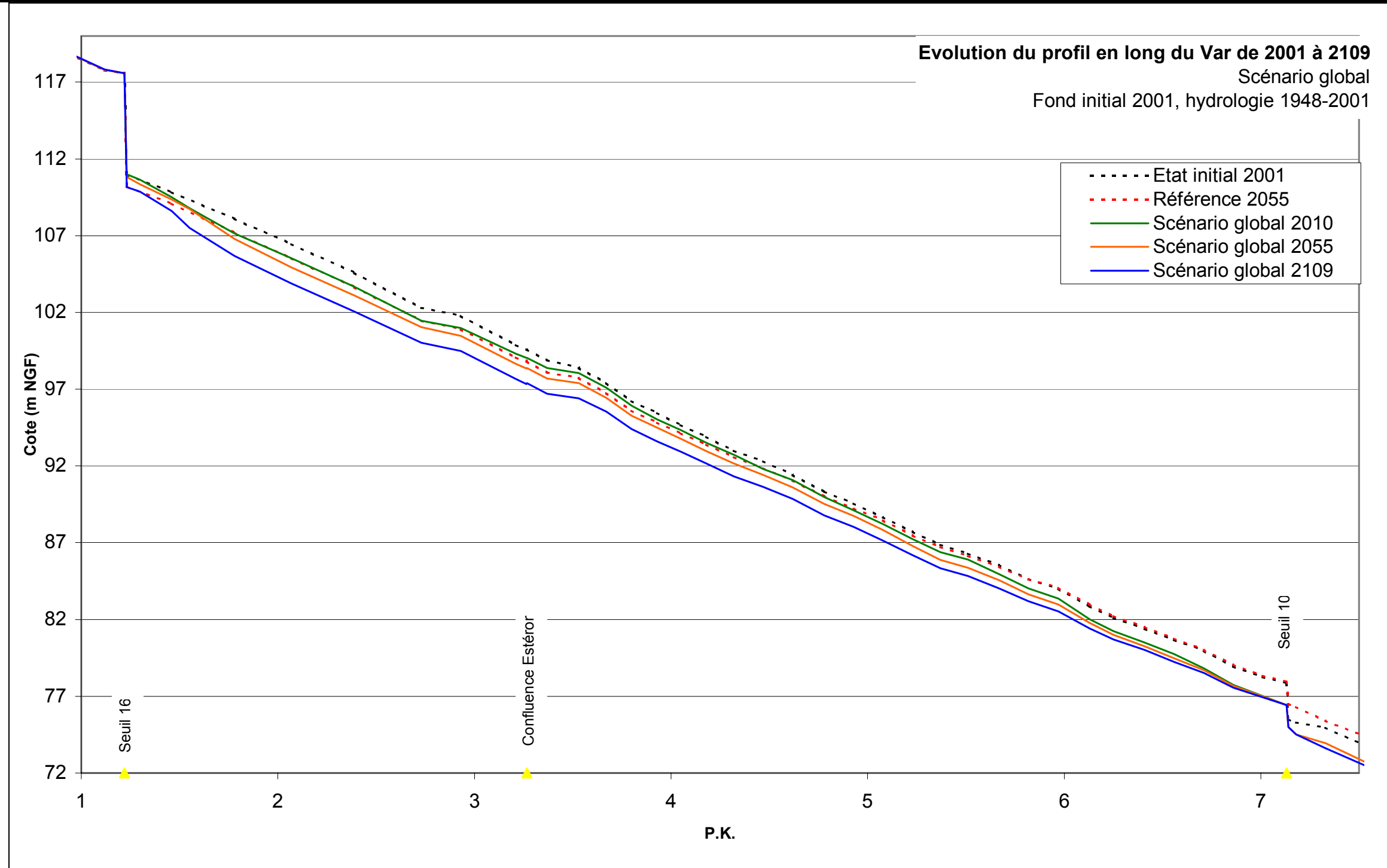
La stratégie envisagée a pour but de ne pas trop déstabiliser le fond dans les biefs malgré les abaissements, ceci afin de ménager les protections de berges et aussi de maintenir une couverture graviers prévenant l'érosion des limons. Au cours des simulations, nous avons constaté que les variations du fond du lit restent dans certaines limites et sont en principe acceptables.

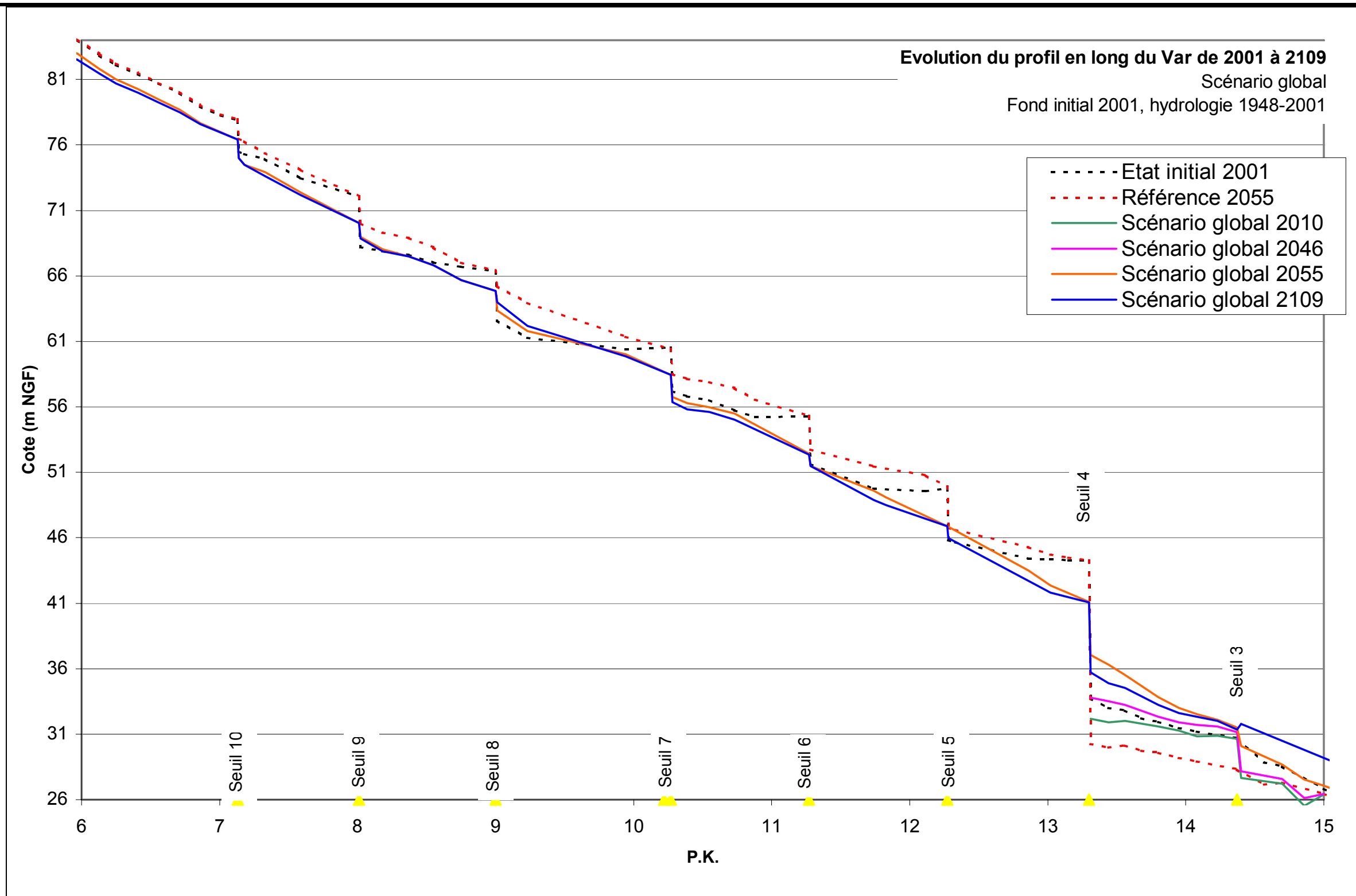
Mais il existe un potentiel d'optimisation particulier à chaque seuil et à chaque période d'abaissement. Il conviendra d'effectuer une nouvelle analyse de l'évolution des fonds avant chaque abaissement en intégrant les dernières données connues (avancement du front de gravier, hydrologie, topographie, ...). Cela ne concerne pas l'abaissement du seuil 9, qui peut être abaissé dès aujourd'hui.

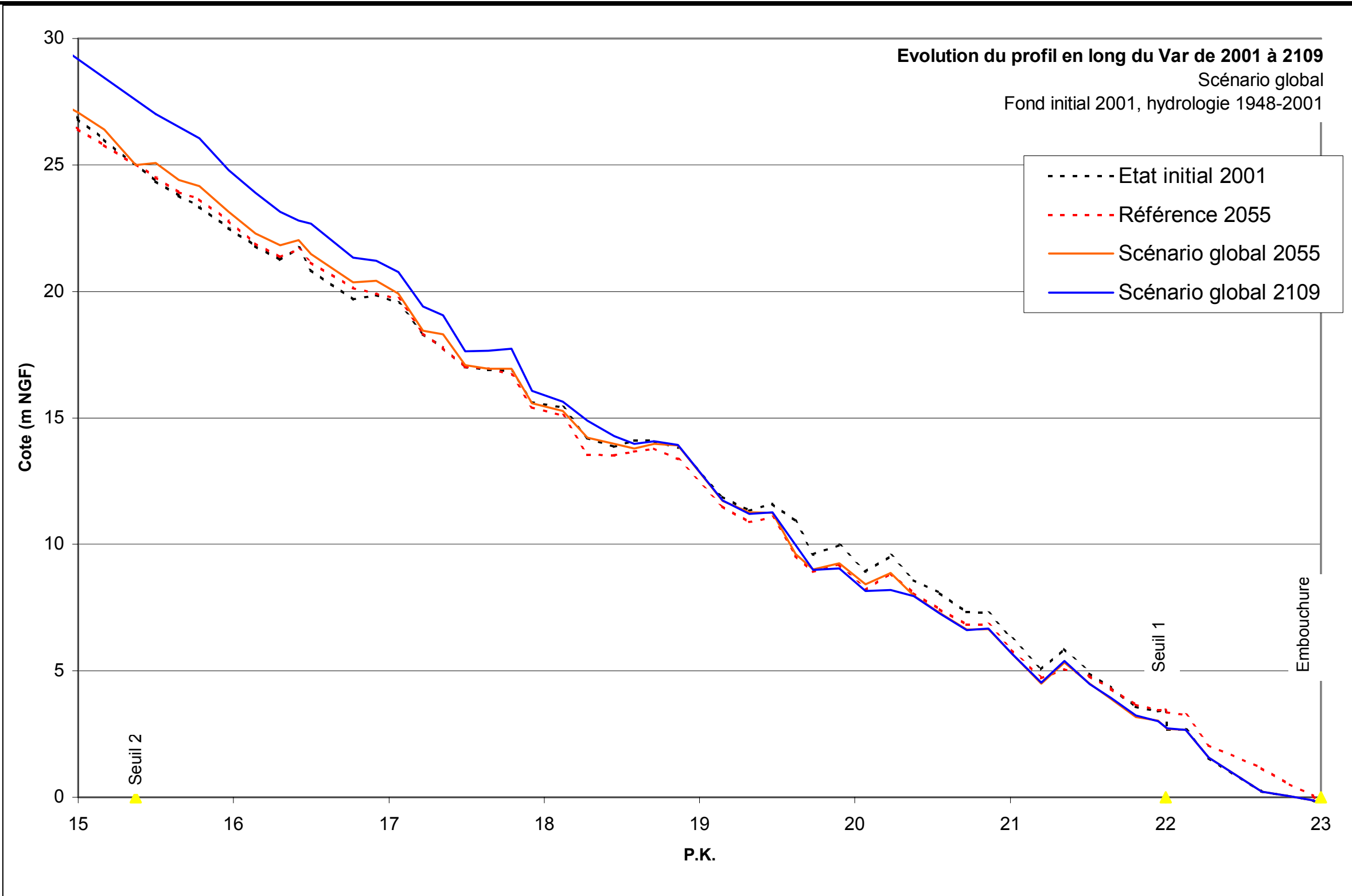
Le premier graphique présente une vue globale de l'évolution du fond dans la basse vallée. Les 3 graphiques suivants sont des agrandissements de certaines zones.

Le transport cumulé est représenté sur les deux dernières figures. On y trouve d'abord le transport reporté pour les trois périodes hydrologique, ainsi que la moyenne sur les 54 ans. Sur la deuxième figure se trouve la documentation de la deuxième période de 54 ans, comparée aux résultats antérieurs.

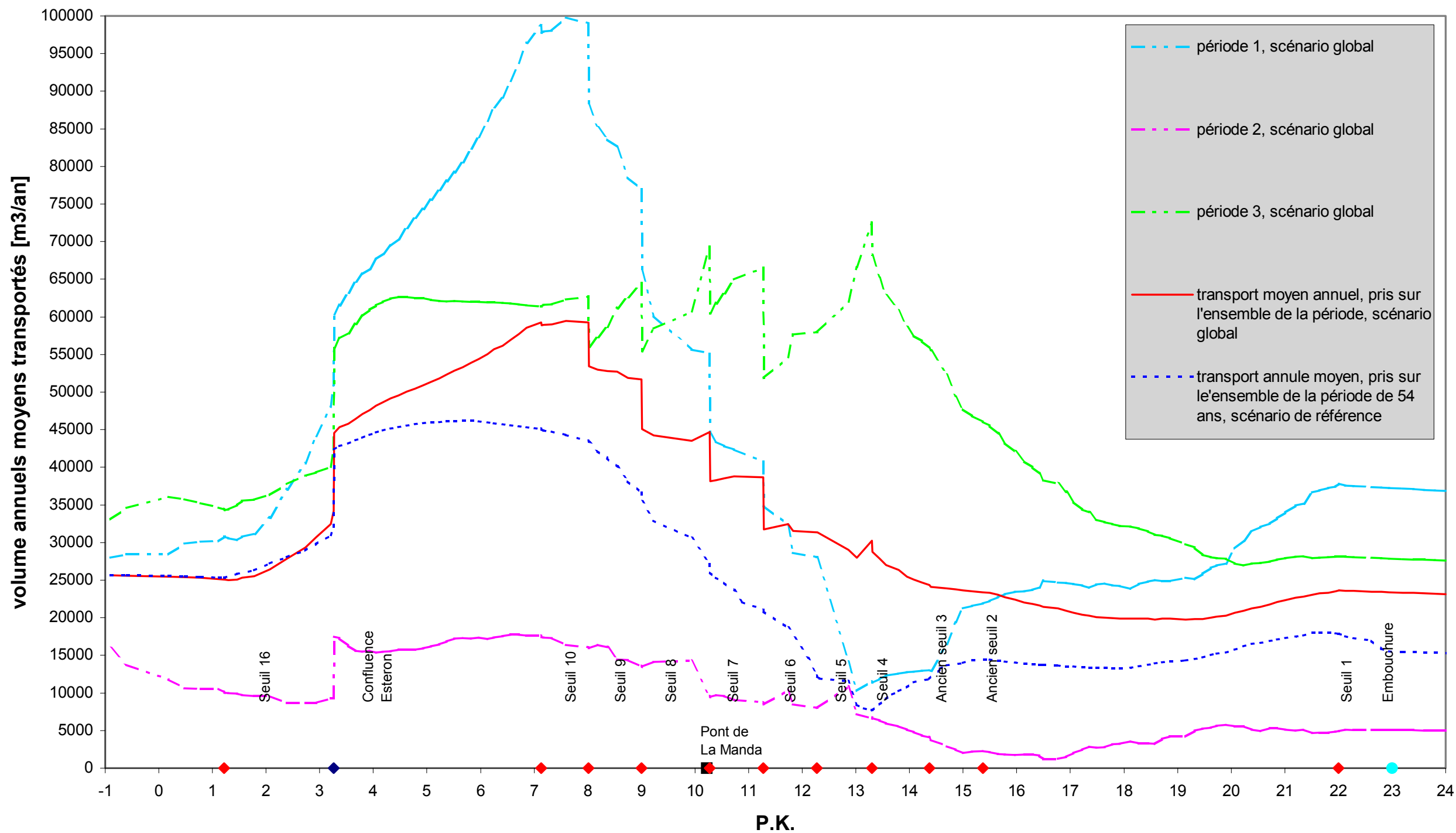




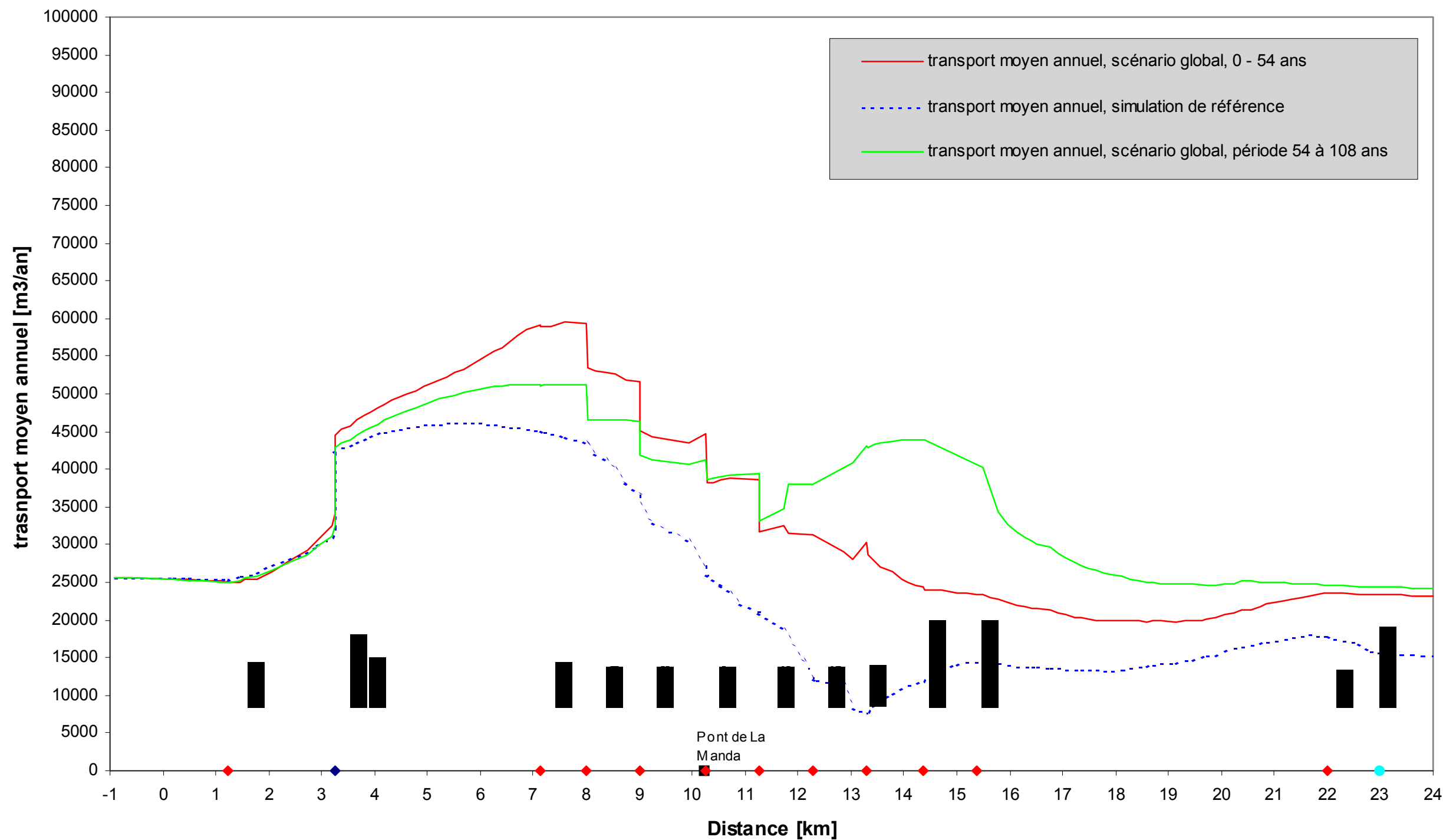




Var - Scénario global - Diagramme de transport sur 54 ans (Periode 1948 à 2001)



Var - Scénario global - simulation sur 2 périodes de 54 ans



Le pavage artificiel à l'aval du seuil 16 permet de maintenir les fonds quasiment au niveau actuel. Cette stabilité n'est assurée que si les blocs emportés vers l'aval sont remplacés au fur et à mesure de leur départ. Mais ce système ne permet probablement pas d'assurer la tenue des fonds à long terme. La chute déjà importante sur le seuil 16 devrait donc à terme encore augmenter, nécessitant la reprise de l'ouvrage ou la construction d'un contre-seuil à l'aval. Il semble aussi que l'évolution du fond au pied du seuil 16 dépende passablement des conditions d'apport de l'Estéron. Les apports grossiers ont tendance à former une sorte de point fixe à la confluence. En simulation, après le passage de quelques crues moyennes du Var, ce point « fixe » a tendance à céder et donc à augmenter la sollicitation au pied du seuil 16.

L'abaissement du seuil 10 permet de baisser la cote de la ligne d'eau jusqu'au pied du seuil 16, diminuant d'autant les risques d'inondation. Toutefois, le linéaire étant très important (du P.K. 1.2 au P.K. 7.13), l'abaissement n'est pas immédiat sur l'ensemble du tronçon, une dizaine d'années est nécessaire après l'abaissement du seuil 10 avant de constater un abaissement des fonds sur tout le linéaire. De plus, en cas de forte crue de l'Estéron, l'affluent peut créer « une bosse » de matériaux au niveau de la confluence qui rehaussera temporairement les lignes d'eau (comme après la crue de 1994).

On remarque que l'abaissement des fonds du seuil 16 au seuil 10 est encore très sensible pour la période simulée de 2055 à 2109. Cela est dû aux conditions d'apport amont, qui restent identiques dans la modélisation aux conditions établies pendant la période de calage (1995 à 2001). Il est fort probable que dans un horizon de plusieurs dizaines d'années, l'apport amont augmente du fait du remplissage des souilles du Var et de ses affluents à l'amont de la basse vallée. L'augmentation de l'apport amont devrait alors favoriser à long terme le maintien d'une pente plus forte à l'amont du seuil 16 que celle obtenue en conservant l'apport estimé au moment du calage du modèle et utilisé dans la simulation. Cette pente plus forte à l'amont de la basse vallée permettra un apport de matériaux plus important que celui utilisé lors de la simulation et devrait donc limiter l'abaissement entre le seuil 16 et le seuil 10. La simulation fournit donc une estimation des fonds pessimiste sur ce tronçon.

Des interrogations subsistent toutefois pour le cas du seuil 10. Son abaissement permettrait de dégager une grosse quantité de matériaux, accélérant de façon notable l'avancée de la langue. De plus cela permettrait de diminuer les risques d'inondation à l'amont de ce seuil. Mais la zone depuis la confluence avec l'Estéron jusqu'au seuil 10 est un lieu d'échange important entre le fleuve et la nappe. L'abaissement du seuil 10 et donc des fonds à l'amont risque d'entraîner un abaissement de la nappe et de diminuer la recharge de cette dernière. Une connaissance approfondie des phénomènes d'échange entre le fleuve et sa nappe permettrait de mieux estimer l'impact de l'abaissement éventuel du seuil 10. La simulation testée prend en compte l'abaissement du seuil 10 (de 1.50 m).

L'abaissement successif des seuils atteint l'objectif voulu :

- Diminution du risque inondation dans les biefs et à l'amont du seuil 10
- Accélération du retour des matériaux à l'aval du seuil 4

Les diagrammes illustrant le transport moyen par an documentent cette accélération. La courbe de la première période montre un nouveau maximum du transport moyen de l'ordre de 100 000 m<sup>3</sup>/an. Grâce à cela, mais aussi aux abaissements successifs, le remplissage se fait déjà dans tous les biefs pour cette période. Lors de la deuxième période, on note une tendance au dépôt en aval du seuil 4, mais son ampleur est faible à cause de l'hydrologie. Pendant la troisième période, le transport est presque continu à travers la série de seuils, et le remplissage se fait en aval du seuil 4. Cette tendance se confirme pour la deuxième période de 54 ans considérée. On notera qu'à la fin de la simulation, tout l'apport solide ne peut transiter vers la mer sans rehaussement du lit depuis l'aval du seuil 4 jusqu'au P.K.17. Il est évident que cette évolution ne peut se faire que dans un futur lointain, mais il est intéressant de noter qu'un équilibre du transport solide ne peut être atteint à long terme.

Le volume de matériaux dégagé grâce aux abaissements successifs des seuils, n'empêche pas l'abaissement des fonds à l'aval du seuil 4 pendant les premières années de la simulation (2 m par rapport au fond 2001) ce qui s'explique par le temps que mettent les graviers à rejoindre le seuil n°4. Mais dès que les matériaux passent le seuil n°4, les fonds à l'aval immédiat se rehaussent et on retrouve le niveau 2001 au bout de 45 ans dans les conditions de la simulation. Les fonds remontent même de 3 m par rapport au niveau 2001 à l'aval du seuil 4 à la fin de la 1<sup>er</sup> période simulée (au bout de 54 ans).

Toutefois, dans la simulation, le maintien des restes du seuil 3 a fortement limité l'érosion à l'aval du seuil n°4. La chute constatée à l'aval du seuil 3 atteint 3 m en cours de simulation. Cette chute est bien entendue irréaliste à moins de prévoir des structures ayant la stabilité nécessaire. La construction d'un contre-seuil à l'aval du seuil 4 aurait cet effet.

L'abaissement du seuil 1 se fait sentir jusqu'au P.K. 19.3. L'abaissement permet donc de diminuer les risques d'inondation sur cette zone. Les fonds du seuil 4 au P.K. 19.3 s'abaissent pendant les 50 premières années puis sont en rehaussement après le retour des matériaux.

#### **2.4.3.2. VARIANTE SANS ABAISSEMENT DU SEUIL 10**

A la suite de cette simulation, une réflexion et une simulation ont été menées pour évaluer l'impact de l'ensemble des aménagements sans l'abaissement du seuil 10.

Les résultats de cette simulation ont montré que l'abaissement du seuil 10 avait un effet sur les premières années. Si le seuil 10 n'est pas abaissé, un volume d'environ 350 000 m<sup>3</sup>, autrement libéré assez soudainement par érosion régressive, ne participe pas au remplissage des biefs. Le fond calculé après 18 ans montre des différences locales notables par rapport au cas précédent. Les moments, auxquels il faut abaisser les seuils, deviennent un peu plus espacés. Il est clair que l'abaissement du seuil 10 apporte non seulement un volume important de matériaux mais limite également à court et moyen terme en de nombreux points les effets de l'incision. A cela il faut ajouter le gain de capacité d'écoulement du seuil 16 au seuil 10 (principalement de la confluence avec l'Estéron au seuil 10). La décision d'abaisser le seuil 10 dépendra donc de la comparaison de ces avantages avec les incidences sur la nappe.

#### **2.4.3.3. BEC DE L'ESTÉRON**

Une possibilité d'accélérer le retour du transport solide dans la basse vallée consiste à libérer une certaine quantité de matériaux du Bec de l'Estéron, en détruisant les protections de berges et en laissant l'érosion latérale se produire. Il faudrait éventuellement accélérer le processus en déplaçant mécaniquement un certain volume de matériaux.

Nous avons simulé cette érosion latérale en augmentant de 140 m la largeur du chenal du Var, au droit du bec, sur une longueur de 800 m. Ceci correspond à un apport latéral de 500 000 m<sup>3</sup> en volume total.

L'effet de cet apport supplémentaire est assez important pendant les premiers 18 ans de simulation, période pendant laquelle l'apport supplémentaire est effectif. Cet apport contribue à stabiliser temporairement la cote du fond en aval du seuil 16. Cependant l'effet vers l'aval diminue et on ne constate pratiquement plus d'effet en aval du seuil 10.

A plus long terme, les résultats de ce scénario se rapprochent de ceux du scénario de référence. Ceci n'est pas étonnant, puisque l'apport supplémentaire est limité dans le temps (l'érosion latérale se déroule sur moins d'une vingtaine d'années).

De plus, il subsiste un rehaussement local au droit du bac après 54 ans. Les conditions hydrauliques exigent ce rehaussement afin d'assurer la continuité de charriage par conservation

de l'énergie spécifique au passage d'une section étroite à une section plus large. Ce rehaussement retient donc une partie des matériaux apportés de l'amont, ce qui explique l'incidence relativement faible de l'apport supplémentaire.

On peut tout de même envisager cette solution en vue d'un certain soulagement de la situation en aval du seuil 16 dans l'attente d'un apport augmenté de l'amont. L'argument majeur pour un tel aménagement serait paysagiste ; le Var élargi correspondrait dans une certaine mesure à un état naturel du fleuve.

## **2.4.4. CONCLUSION DES SOLUTIONS D'AMENAGEMENT**

### **2.4.4.1. PRESENTATION**

Suite à l'analyse précédente, il apparaît possible de préconiser une solution globale d'aménagement permettant d'accélérer de façon notable le retour du transport solide tout en garantissant, voire en améliorant la protection de la basse vallée contre les risques naturels.

Cette solution comprend :

- L'aménagement du seuil 16 pour permettre un effacement partiel en crue
- la suppression de toute la superstructure du seuil n° 10 (microcentrale, voie d'accès...),
- l'abaissement progressif des seuils 9 à 4, de l'amont vers l'aval, en fonction de l'avancement des graviers dans les anciennes souilles d'extraction,
- la stabilisation du pied du seuil n°16 par la mise en place d'un pavage artificiel en blocs de très fortes dimensions,
- l'abaissement du seuil n° 1, afin d'améliorer les conditions d'écoulement dans toute la basse vallée.

L'abaissement d'un seuil devra être optimisé en fonction des conditions hydrologiques et des risques d'inondations locaux. Cependant, la logique générale qui devra être suivie devrait être la suivante :

- Contrôle de l'avancée des graviers par photogrammétrie régulière, mais aussi par vérification de la part de l'exploitant des microcentrales de l'arrivée des matériaux grossiers à la prise d'eau.
- Dès que l'avancée de la langue de graviers dans le chenal central aura atteint environ 2/3 de la longueur totale du bief considéré, ou que la charge en graviers dans la prise d'eau des turbines aval sera sensible, il conviendra de lancer les opérations de recépage de l'ouvrage, ainsi que les protections des berges associées à l'amont immédiat de l'ouvrage recépage. Une analyse fine du linéaire à protéger devra être alors réalisée sur les tronçons devant être soumis à l'érosion régressive. Le recépage du seuil devra être total (microcentrale et voie d'accès).

Les hauteurs approximatives de recépages sont données par le tableau suivant, élaboré de manière à permettre un abaissement des lignes d'eau centennales sous le niveau du terrain naturel à l'extérieur des digues :

Seuil	Abaissement
9	2,00
8	1,50

7	2,00
6	3,00
5	3,00
4	3,30

Le seuil n° 10 pourrait être recépé de l'ordre de 1,5 mètres pour assurer la même protection dans le bief S10-S16. Cependant, ce recépage entraînera un abaissement général dans l'ensemble de la ligne d'eau d'étiage et donc du niveau d'échange entre la nappe d'accompagnement et le Var. Une étude précise devra déterminer si cet abaissement est acceptable au regard des différents enjeux locaux (champs captant et captages agricoles). L'abaissement du seuil n° 1 devra être limité à 0,5 mètre, afin d'éviter d'affouiller les ouvrages amont et pour limiter les risques hydrauliques ultérieurs.

L'aménagement à prévoir sur le seuil 16 n'a pas été étudié de façon précise. Il s'agirait de permettre l'effacement d'une partie de l'ouvrage en crue afin d'abaisser les lignes d'eau et de limiter l'engravement à l'amont.

#### **2.4.4.2. IMPACT**

Après réalisation de cette solution d'aménagement globale, l'accélération du retour du transport solide devrait être notable. Il est difficile de la quantifier, mais si l'on analyse l'évolution au cours du temps entre le scénario de référence et le scénario global des zones en incision et de celles en engravement, on constate un gain d'environ une vingtaine d'années sur les 54 ans simulés. Autrement dit, le faciès obtenu au bout de 54 années dans le cas où aucun aménagement ne serait réalisé, serait obtenu au bout de 34 ans environ, avec les mêmes conditions hydrologiques, dans le cas du respect du programme d'aménagement proposé.

A ce retour du transport solide s'associe un retour du faciès méditerranéen et du lit en tresse caractéristique d'une rivière torrentielle, comme on a déjà pu le constater entre les seuils 10 et 9.

L'impact hydraulique de la solution proposée est, de même, très sensible. En effet, par abaissement mécanique aux points les plus sensibles actuellement, c'est-à-dire à l'amont immédiat des seuils, et par accélération de la vitesse moyenne d'écoulement du fait des pentes restaurées, il est possible de limiter très sensiblement le risque d'inondation pour la crue centennale ( $3\,500\text{m}^3/\text{s}$ ) dans la basse vallée.

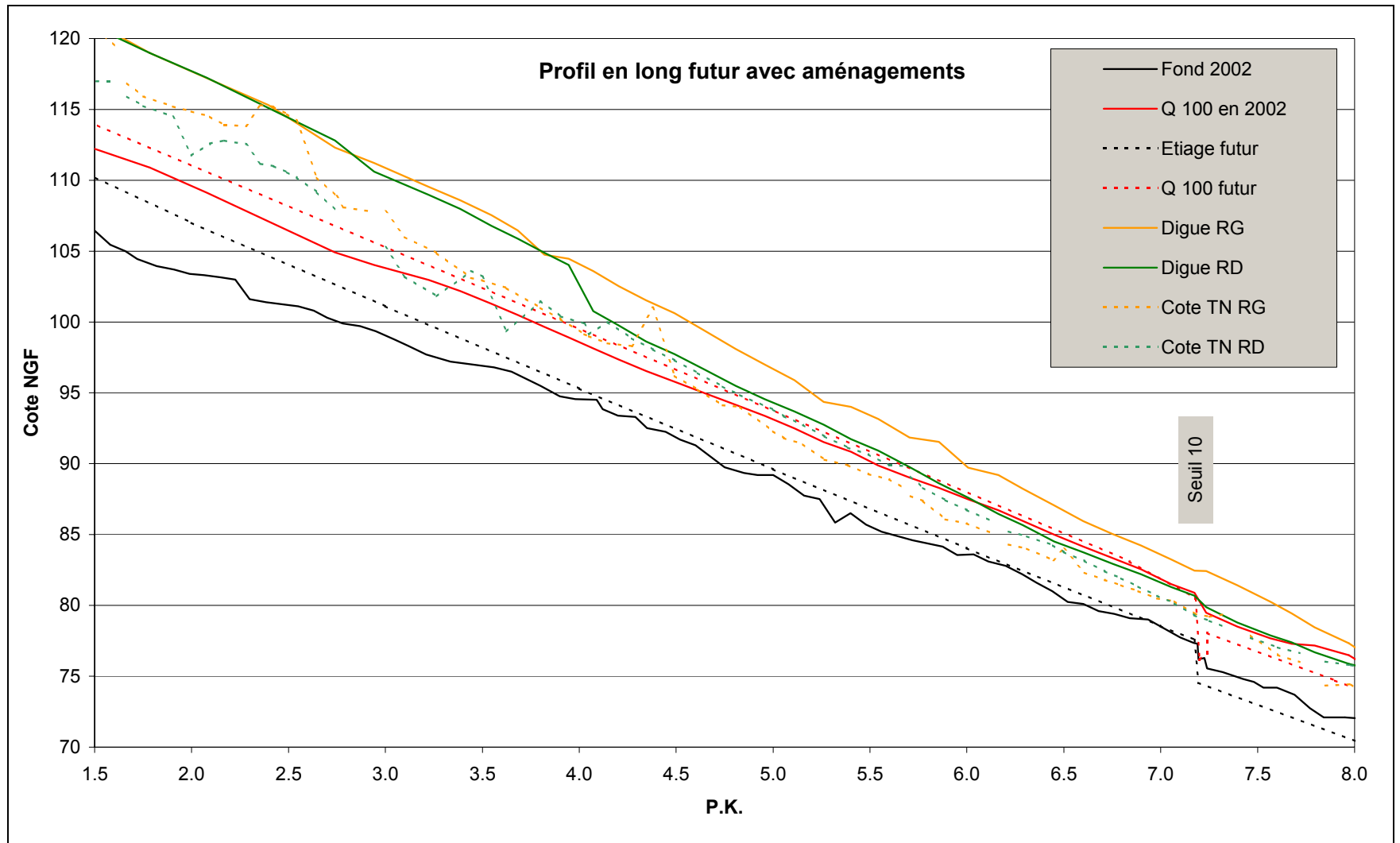
Les profils en long ci-après permettent de visualiser cet effet de protection.

On retrouve :

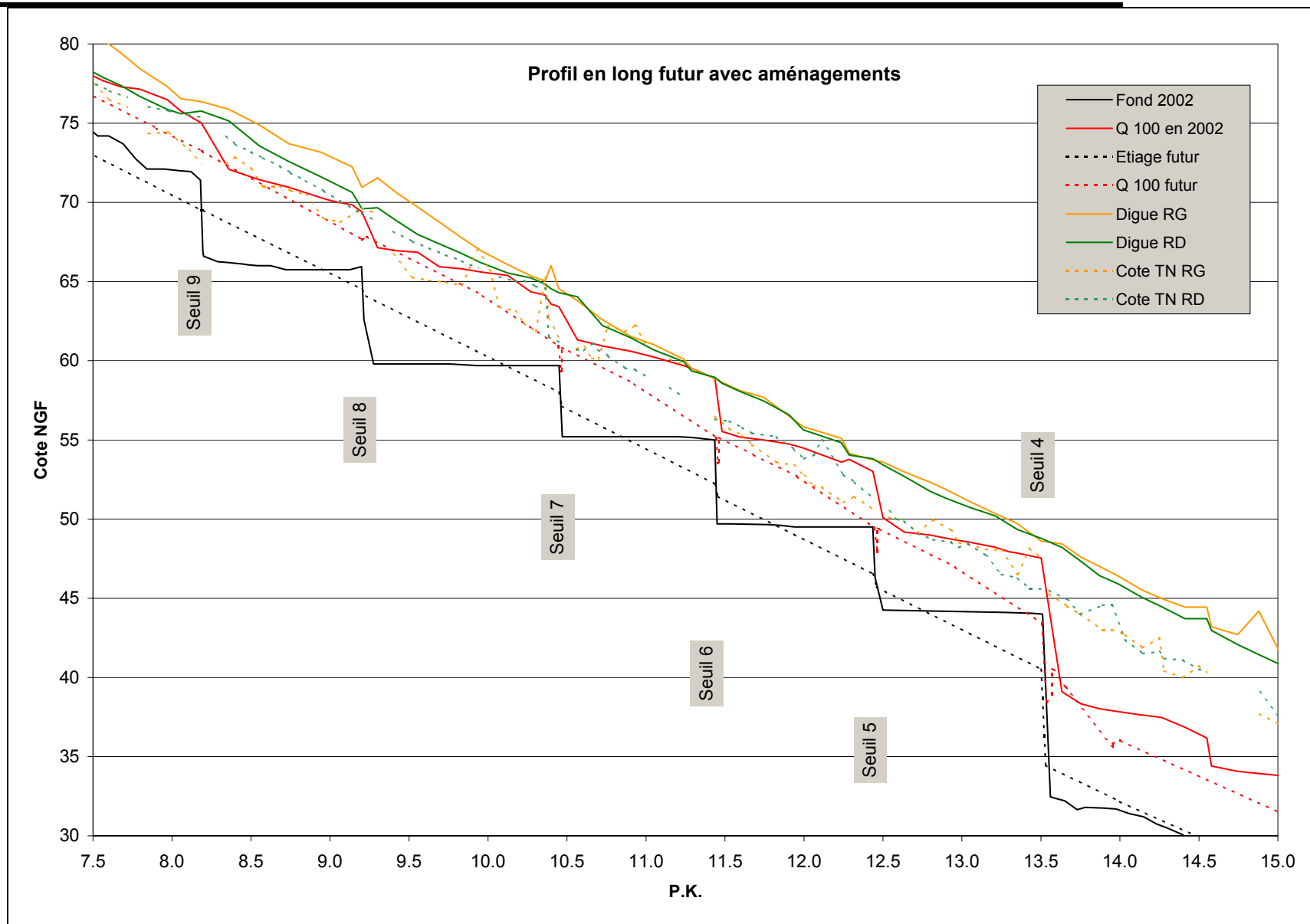
- la cote des fonds 2001,
- la cote des fonds moyens futurs après réalisation de l'intégralité de la solution globale,
- les cotes des crêtes des digues RG et RD actuelles,
- Les cotes des terrains naturel RD et RG,
- les lignes d'eau pour  $Q_{100}$  ( $3\,500\text{ m}^3/\text{s}$ ) actuelles et à terme.

Cette figure permet de mettre en évidence un abaissement significatif des lignes d'eau de crue en chacun des points sensibles, permettant de limiter le niveau de la crue centennale à celui de terrain naturel, les prises en compte des endiguements. Seul le tronçon situé à l'amont immédiat du seuil n° 10 reste fortement sensible, dans la mesure où nous n'avons prévu pour l'instant aucune aménagement (hors la suppression de la microcentrale), dans l'attente de

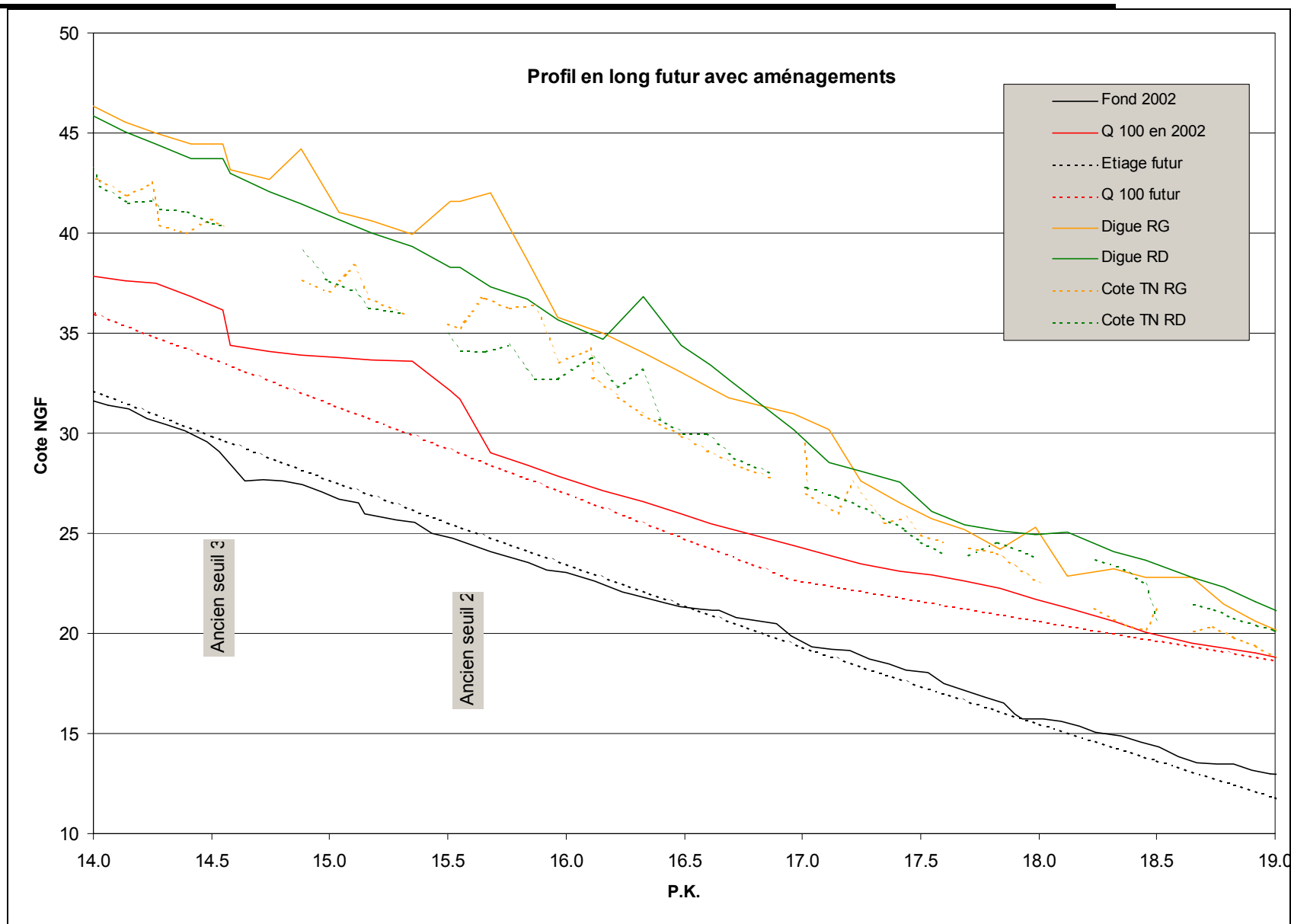
l'étude complémentaire sur la nappe du Var. L'abaissement futur du seuil n° 10 permettrait évidemment de limiter ainsi les risques hydrauliques au droit de l'ensemble de la zone industrielle de Carros.



SMEBVV (SYNDICAT MIXTE D'ETUDES DE LA BASSE VALLEE DU VAR)  
ETUDE DU FONCTIONNEMENT PHYSIQUE DU LIT DU FLEUVE VAR  
RAPPORT



SMEBVV (SYNDICAT MIXTE D'ETUDES DE LA BASSE VALLEE DU VAR)  
ETUDE DU FONCTIONNEMENT PHYSIQUE DU LIT DU FLEUVE VAR  
RAPPORT



L'un des objectifs des aménagements et de l'abaissement des seuils est notamment de faire passer la crue centennale sous le niveau des terrains naturels RD et RG. Les graphiques précédents montrent qu'à long terme, cet objectif est atteint sur tout le linéaire de la basse vallée sauf à l'amont de la confluence avec l'Estéron au seuil 10, puisque nous n'avons pas considéré d'abaissement de ce seuil. Du seuil 10 au seuil 4, par contre les aménagements permettent de faire passer la crue centennale juste sous le niveau du terrain naturel.

**2.4.4.3. CHIFFRAGE SOMMAIRE DE LA SOLUTION PROPOSEE**

Le recépage des seuils, tel qu'envisagé dans la stratégie globale décrite ci-dessus devra être étudié de manière spécifique pour chacun des ouvrages. En effet, les techniques de construction retenues sont très hétérogènes et il n'apparaît pas possible d'envisager une méthode de reprise équivalente pour tous les ouvrages.

En se basant sur l'ouvrage type décrit pour le seuil 6, il apparaît qu'un recépage supérieur à 2,00 m entraînerait la mise à nu de la couche de tout-venant compacté, ce qui n'apparaît pas admissible. Dans ce cas, la reprise totale de l'ouvrage doit être considérée. Pour les ouvrages dont la hauteur d'abaissement est inférieure à 2,00 m, il devrait être possible d'envisager une solution de recépage sans démolition ou sans précaution d'exécution particulière.

Il convient d'autre part de noter que le déséquipement de chacune des microcentrales amènera à prévoir le remplissage de la cavité ainsi créée, par un massif coulé en place de béton maigre (ou de béton cyclopéen).

L'avant-métré de la solution proposée serait alors le suivant :

	S16	S9	S8	S7	S6	S5	S4	S1
Enrochements m <sup>3</sup>	60 000							
Béton cyclopéen m <sup>3</sup>		1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500	1 500
Démolition m <sup>3</sup>		3 000	2 000	3 000	6 000	6 000	6 000	6 000
Recépage palplanches ml								400
Béton m <sup>3</sup>		3 000	3 000	3 000	3 000	3 000		200
Protections en enrochements m <sup>3</sup>		20 000	17 000	30 000	25 000	25 000	25 000	45 000

Ce qui amène à un coût global estimé de la solution globale proposée de :

S16	5 000 000 €
S9	3 200 000 €
S8	3 000 000 €
S7	3 600 000 €
S6	3 800 000 €
S5	3 800 000 €
S4	3 000 000 €
S1	4 000 000 €
<b>Total</b>	<b>29 400 000 €</b>
<b>10 % Main d'oeuvre</b>	<b>2 940 000 €</b>
<b>15 % divers et imprévus</b>	<b>4 410 000 €</b>
<b>Total Global</b>	<b>36 750 000 €</b>

Cette estimation sommaire tient compte d'hypothèses très simplificatrices concernant le calage et le choix des protections longitudinales de part et d'autre des seuils et des différents ouvrages, ainsi que sur les volumes de matériaux à mettre en œuvre pour assurer la stabilité des ouvrages recépés.

Le coût de l'abaissement du seuil 1 est très élevé compte tenu de la nécessité de recéper les palplanches qui le composent.

Le coût de l'aménagement du seuil 16 pour permettre l'effacement partiel de l'ouvrage en crue n'a pas été évalué. Une étude particulière est nécessaire pour ce chiffrage.

---

## 3. OBSERVATOIRE DU VAR

---

Le manque de données historiques précises sur le Var a été, et reste un des handicaps les plus forts pour la définition des stratégies d'aménagement et pour le développement d'une concertation effective entre tous les acteurs.

Le ressenti, ou le vécu, de chacun de ces acteurs par rapport à la rivière porte sur une période courte et récente marquée par une évolution très forte de l'hydrosystème sous l'influence de l'urbanisation et de l'artificialisation du cours d'eau, ainsi que par une hydrologie naturelle très faible. Dans ces conditions, les prises de décisions concernant l'évolution future et la gestion du fleuve ne s'appuient pas sur un socle incontestable de connaissance.

Il apparaît nécessaire de mettre en place une structure de collecte et d'archivage de l'ensemble des données permettant d'affiner la compréhension du fonctionnement du bassin.

L'objectif de ces mesures ne sera pas de geler l'aménagement de la vallée jusqu'à l'obtention d'un corpus de données suffisant pour une analyse fine du fonctionnement, ce qui bloquerait totalement la concertation en cours et entraînerait la poursuite de l'aménagement anarchique de la zone d'étude. Par contre, cette observation du fonctionnement physique doit servir à faire vivre la stratégie globale d'aménagement décrite précédemment, à la recaler et à enclencher de manière logique les différentes composantes de cette stratégie.

Les mesures à effectuer portent principalement sur :

- l'évolution altimétrique des fonds moyens sur l'ensemble de la basse vallée,
- les conditions d'apport solide à l'amont et du retour du transport à partir de la Mescla ou de l'Esteron,
- le suivi de l'avancement du « front » d'engravement dans les souilles enlimentées

### 3.1. EVOLUTION ALTIMETRIQUE DES FONDS MOYENS

#### 3.1.1. VALLEE DU VAR :

La connaissance de l'évolution du profil en long d'étiage du Var entre la mer et la confluence de la Vésubie est essentielle pour prévoir les tendances locales d'évolution, à partir de la structure des pentes et de prévoir les secteurs potentiellement les plus vulnérables, que ce soit par rapport au risque inondation (engravement) que par rapport aux risques d'érosion.

Le suivi du profil en long d'une ligne d'eau reste le meilleur indicateur de l'évolution d'ensemble, mais il faut s'assurer que les levés successifs sont effectués à des débits comparables.

Nous proposons, pour le Var, que ces profils en long d'étiage soient réalisés pour des débits mesurés au pont Napoléon III compris entre 30 m<sup>3</sup>/s et 40 m<sup>3</sup>/s.

La fréquence du suivi du profil en long sera de un levé tous les cinq ans, complété par un levé général après chaque épisode de crue dont le débit mesuré à la station de Nice Napoléon III aura été :  $Q > 1500 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Ce levé de profil en long devra répondre aux exigences suivantes :

- relevé de la cote de la surface de l'eau du bras principal du Var tous les 150 m en moyenne,
- levés complémentaires au minimum :
  - un point à l'amont de chaque seuil de gravier (rupture de pente),
  - un point à l'aval de chaque seuil de gravier,
  - un point à l'amont de chaque seuil artificiel à environ 10 m de la crête,
  - un point à l'aval de chaque seuil artificiel.

La longueur réelle de l'écoulement du bras principal entre deux points devra impérativement être donnée.

La précision minimale devra être :

- en altimétrie de 5 cm minimum (IGN 69),
- en planimétrie de 10 cm minimum (Lambert III).

Le coût d'un tel profil en long peut être estimé à environ 10 000 € HT.

### **3.1.2. ESTERON ET VAR AMONT :**

Le retour du transport solide dans la basse vallée, et sa dynamique, sont très fortement fonction des conditions du transport dans les affluents amont.

Du fait des extractions anciennes, on a vu que la vallée du Var, dans les gorges de la Mescla, est encore soumise à une érosion sensible et que dans les secteurs de divagation, la pente y est localement faible. Le pied du seuil EDF de la Mescla, très affouillé, met d'ailleurs en évidence cette érosion. Par contre, on constate des signes de retour du transport solide en amont de la gorge de la Mescla. De même, le régime anciennement perturbé de la Tinée semble retrouver son équilibre naturel.

La Vésubie et l'Estéron n'ont pas ou très peu été perturbés par des prélèvements. On peut donc admettre qu'ils fournissent toujours un apport solide correspondant aux conditions naturelles. Dans sa partie terminale, l'Estéron a été l'objet d'une érosion régressive intense, ce qui limite énormément la mobilité du lit, qui entraîne un pavage général du tronçon entre le pont de la RD et la confluence. Cela entraîne dans un premier temps un apport solide supplémentaire mais qui va en s'amenuisant au fur et à mesure que cette érosion régressive progresse. A terme l'apport solide sera moins important que dans les conditions naturelles.

Il paraît indispensable de suivre topographiquement l'évolution des fonds :

- entre le seuil N°16 et le seuil de la Mescla,
- entre la confluence de l'Estéron et le pont de la RD.

Ce suivi pourra être réalisé sous la forme de profil en long d'étiage, avec les mêmes contraintes que définies précédemment.

Dans l'hypothèse où les pentes tractrices augmenteraient sensiblement, les conditions de retour du transport s'en trouveraient accélérées et la dynamique de la gestion de la basse vallée devrait être adaptée. En particulier, si les conditions de retour du matériau solide à l'amont du

seuil 16 devaient se rapprocher des conditions « naturelles » (pente de l'ordre de 6‰), il deviendrait possible d'envisager un abaissement du seuil n°16 permettant d'assurer la protection définitive contre les crues du quartier du Gabre et de limiter les contraintes hydrauliques sur le seuil n°16. Il serait même judicieux, au lieu d'attendre que le lit se rehausse à la confluence avec la Vésubie, pour atteindre cette pente de 6‰, de modifier l'ouvrage du seuil 16 pour permettre un effacement partiel en crue afin d'abaisser les lignes d'eau et limiter l'engravement. Il faut donc observer l'évolution du fond à la confluence avec une attention particulière.

Le coût de chacun de ces profils en long peut être estimé à 2 000 € HT.

### **3.1.3. SUIVI PHOTOGRAPHIQUE**

Le suivi photographique, par photographie aérienne, permet d'accumuler des informations précieuses pour décider du traitement global.

L'IGN réalise très régulièrement des campagnes photogramétriques à l'échelle du 1/25 000.

La collecte systématique de ces photographies sur l'ensemble de la vallée à intervalle régulier (5 ans) permettrait une comparaison aisée :

- des formes morphologiques développées,
- de l'avancée des fronts de graviers dans la zone enlimonée,
- du développement du bras très érosif dans le tronçon aval et de la localisation des zones d'attaque prévisible.

Un nombre notable de ces campagnes de terrain est disponible, mais de manière dispersée dans les différentes administrations.

La centralisation de ces données photographiques permettra, sur une base cartographique, de suivre chacune des évolutions locales.

La dynamique de l'évolution du « front » d'engravement pourra ainsi être reportée sur le SIG qui sera développé pour l'ensemble de la basse vallée.

Le coût d'une campagne aérienne spécifique commandée par le syndicat pour le suivi du Var peut être estimé à 6 000 € HT.

### **3.1.4. SUIVI HYDROLOGIQUE**

L'évolution des fonds dans la basse vallée du Var et le retour du transport solide sont liés aux conditions hydrologiques, c'est-à-dire aussi bien aux crues qu'à la chronique des débits journaliers du Var et de ses principaux affluents.

De ce fait, afin notamment de pouvoir valoriser le modèle MORMO mis en œuvre pour la présente étude dans un but d'optimisation de la gestion de la vallée, il est nécessaire que l'observatoire du Var collecte :

- la chronique des débits moyens journaliers :
  - à la Mescla (stations EDF existant),
  - sur l'Esteron (station du Pont de la Clave),
  - au pont de la Manda et au Pont Napoléon III,
- la chronique des débits déversés au Plan du Var par l'usine EDF,

- les hydrogrammes des crues supérieures :
  - à 1000 m<sup>3</sup>/s à Nice,
  - à 100 m<sup>3</sup>/s sur l'Esteron,
  - à 100 m<sup>3</sup>/s sur la Vesubie (Saint Jean la Rivière),
  - à 800 m<sup>3</sup>/s à la Mescla.

La collecte de ces données nécessitera la mise en place de conventions entre les différents exploitants de station limnimétrique, hors membres de la CLE, son estimation financière est donc délicate.

### **3.1.5. SUIVI GRANULOMETRIQUE**

On a vu précédemment que les matériaux transportés par le Var possèdent des granulométries caractéristiques très hétérogènes, du fait du déséquilibre actuel du transport solide. Dans un système revenu à un fonctionnement plus équilibré, il est probable que les matériaux transportés soient plus homogènes, avec une décroissance amont-aval des diamètres caractéristiques liée à l'usure et au tri granulométrique.

Pour quantifier cette évolution, il paraît souhaitable d'effectuer à intervalles réguliers (tous les 10 ans) une campagne de prélèvements dans la masse et de comptages granulométriques.

Ces prélèvements devront être effectués sur des bancs situés en extrados de courbe, sur des profils en travers repérés et matérialisés sur le terrain par des bornes immersibles.

Ces profils en travers seront localisés :

- à l'amont du pont Charles Albert,
- à l'amont du seuil N°10 (au droit du restaurant Issautier),
- à 500 m à l'aval du seuil 4,
- entre les ponts de l'autoroute et Napoléon III.

Cette campagne périodique sera complétée par un prélèvement pleine masse de matériaux dans la « langue » d'engravement, environ 100 m à l'amont du front exondé. On vérifiera en particulier que le processus de réengravement se poursuit comme jusqu'à présent, par avancement de la langue de gravier sur les dépôts de limons pratiquement sans les éroder, par deux sondages par bief.

Le coût d'une telle campagne (prélèvements et analyses granulométriques) peut être estimé à environ 4 000 € HT.

**ANNEXE – NOTICE MORMO**

---

## Table des matières

	Description du programme MORMO .....	2
1	Bases générales .....	2
1.1	Modélisation et schéma de calculs .....	2
1.2	Introduction de la géométrie d'un profil en travers .....	3
1.3	Introduction de la rugosité de surface .....	4
1.4	Détermination de la pente locale .....	5
1.5	Calcul de la force tractrice non-dimensionnelle .....	5
1.6	Calcul du diamètre moyen .....	6
1.7	Structure des couches .....	6
2	Calcul du charriage .....	8
2.1	Introduction .....	8
2.2	Formule de transport .....	8
2.3	Calcul du charriage par fraction .....	9
2.4	Considérations des variations hydrodynamiques de la force tractrice .....	10
2.5	Profils avec des Bancs et des cuvettes d'affouillement, chenaux en tresse .....	11
3	Références .....	12

---

## Description du programme MORMO

Le logiciel MORMO avait été développé à l'origine au Laboratoire de Recherches Hydrauliques, Hydrologiques et Glaciologiques de l'École Polytechnique Fédérale à Zurich. Il s'agit d'un modèle de simulation numérique unidimensionnel, quasi-stationnaire et explicite qui permet le calcul du transport solide et des changements des niveaux du fond dans des cours d'eau et des retenues. Ces dernières dix années, le modèle a été appliqué à plusieurs tronçons de rivières en Suisse et à l'étranger. Les expériences faites démontrent qu'il est toujours très complexe de saisir les processus morphologiques et que subsiste toujours un important potentiel de développement pour les modèles de transport de sédiments. A l'heure actuelle, le logiciel continue à être développé par le bureau d'ingénieurs Hunziker, Zarn & partenaires, d'entente avec l'EPF Zurich.

### 1 Bases générales

#### 1.1 Modélisation et schéma de calculs

Un système fluvial est modélisé à l'aide de deux types d'éléments, les profils en travers et les nœuds. La géométrie du chenal est caractérisée par ces profils, qui contiennent aussi des informations sur la rugosité des berges et du lit ainsi que sur un éventuel apport ou prélèvement d'alluvions. Une série de profils définissent une branche de rivière. Des ouvrages spéciaux tels que barrages ou seuils ou encore des confluences sont considérés comme des nœuds. Ces nœuds relient les branches de rivières. A l'entrée amont du modèle l'apport solide doit être défini. A l'aval une condition hydraulique, par exemple une fonction niveau-débit doit être connue. Pour chaque branche de rivière un hydrogramme peut être utilisé concernant les débits. La fig. 1 illustre de manière schématique un système fluvial avec 4 branches et 5 nœuds,

Un hydrogramme est subdivisé en laps de temps. Pour chacun de ceux-ci le programme calcule d'abord les lignes d'eau (courbes de remous) et en déduit pour chaque profil des valeurs hydrauliques telles que les vitesses et profondeurs moyennes d'écoulement. Ce calcul est basé sur l'équation de Bernoulli généralisée et la formule des Strickler (1923) concernant la rugosité. On considère le débit comme constant pendant ce laps de temps et sur une branche de rivière. A l'aide des paramètres hydrauliques le

programme calcule ensuite pour chaque profil la capacité de transport solide. Ensuite par application de l'équation de continuité pour les sédiments (équation d'Exner) un bilan est établi considérant pour chaque profil l'apport et le transport vers l'aval, d'où finalement on peut calculer les variations du fond. Si cette variation dépasse une certaine valeur limite définie au préalable, alors le calcul est recommencé pour un laps de temps plus court.

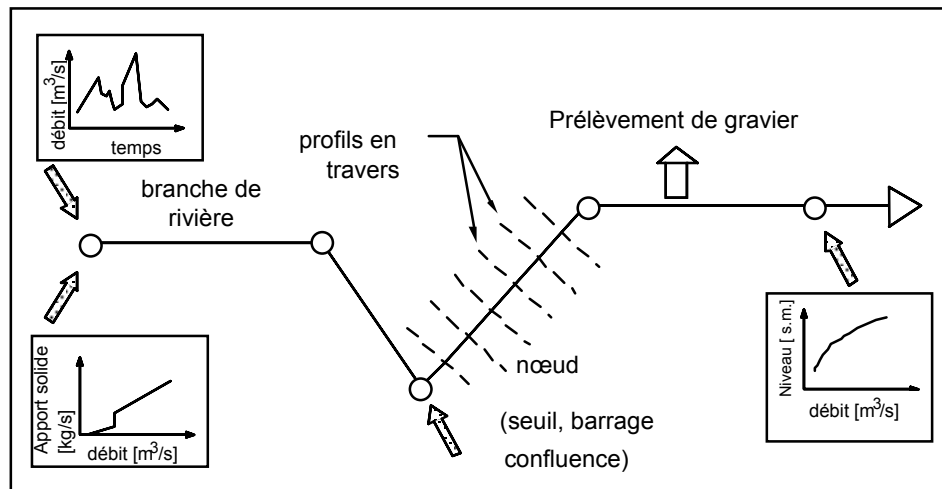


Fig. 1 Modélisation d'un système fluvial.

## 1.2 Introduction de la géométrie d'un profil en travers

Un profil en travers est caractérisé par plusieurs points. Chaque point peut être caractérisé par une valeur de  $k$  selon Strickler décrivant la rugosité de surface. En attribuant des codes à certains points on peut définir différentes parties du profil (lit mineur, lit majeur, fond alluvial, berge). La fig. 2 montre un exemple de profil en travers avec les caractérisations particulières. Le programme MORMO détermine ensuite les paramètres caractéristiques du profil tel que la surface mouillée  $A$ , la largeur  $B_w$  au niveau d'eau, le rayon hydraulique  $R$  et la conductibilité  $K$ , ces valeurs étant enregistrées sous forme de table. Il en résulte des fonctions de ces paramètres dépendants de la profondeur d'écoulement. Ces fonctions sont ensuite utilisés dans les calculs hydrauliques et morphologiques suivants.

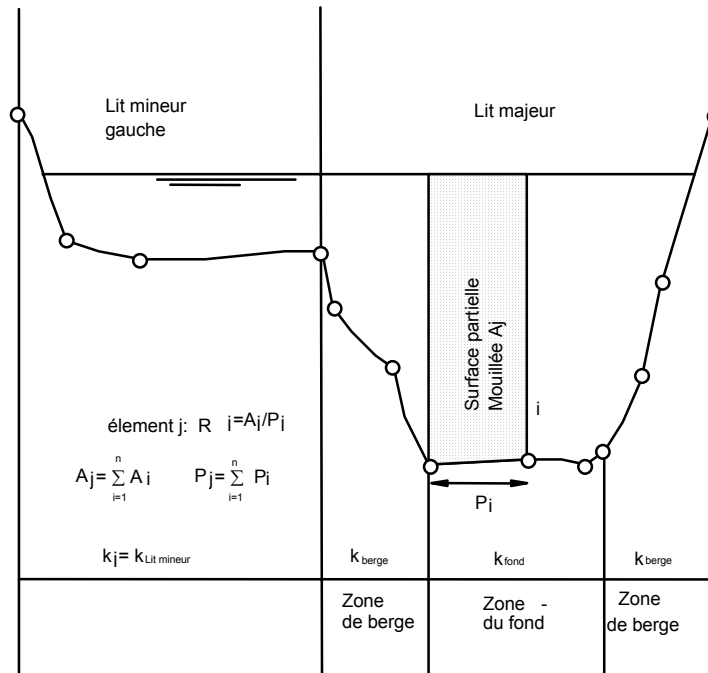


Fig. 2 Section composée :  $R_j$ ,  $P_j$  et  $k_j$  caractérisent le rayon hydraulique, le périmètre mouillé et le coefficient de rugosité selon Strickler pour chaque partie du chenal.

L'équation de continuité pour les sédiments permet le calcul des variations de fond pour chaque profil. Elle peut être répartie de manière uniforme sur la largeur du fond ou proportionnelle à la profondeur d'écoulement.

### 1.3 Introduction de la rugosité de surface

Pour les différentes zones d'écoulement des valeurs de  $k$  selon Strickler sont introduites afin de pouvoir calculer les pertes dues au frottement. Les valeurs sur les talus de berges et le lit majeur sont choisies en fonction des conditions locales (végétation, enrochements, etc.). Pour le fond on calcule la valeur de  $k$  selon la formule

$$k_s = \frac{C}{\sqrt[6]{d_{ms}}} \quad C = 21 - 26$$

$d_{ms}$  = diamètre moyen de la couche de pavage

En calculant une moyenne pondérée selon la procédure d'Einstein (1934) une valeur moyenne  $k_m$  résulte pour l'élément du chenal (lit mineur ou lit majeur).

#### 1.4 Détermination de la pente locale

Lors du calcul des lignes d'eau la vitesse d'écoulement et la profondeur moyenne sont déterminés pour chaque profil. On peut retrouver une pente 'locale' de la ligne d'énergie, qui est ensuite utilisée pour déterminer la force tractrice.

$$J_l = \left( \frac{v_m}{k_m R^{2/3}} \right)^2$$

L'introduction de cette pente locale  $J_l$  rapproche le calcul en conditions non-uniformes à des conditions d'écoulement uniforme. La pente  $J_l$  est déterminée pour la conditions que les vitesses en écoulement uniforme et non-uniforme soit identiques. Des conditions locales particulières comme des rétrécissements et élargissements sont ainsi mieux considérés.

#### 1.5 Calcul de la force tractrice non-dimensionnelle

La force tractrice non-dimensionnelle est calculée en fonction de la profondeur moyenne d'écoulement du lit mineur, la pente locale  $J_l$  et du diamètre moyen des matériaux de fond,  $d_m$

$$\theta'_{dm} = \frac{\mu h_m J_l}{(s-1) d_m}$$

$h_m$  = profondeur moyenne d'écoulement

$J_l$  = pente de frottement des grains

$\mu$  = coefficient considérant les pertes de formes (facteur des rides de fond)

$s = \rho_g/\rho_w = 2.65$

$d_m$  = diamètre moyen des matériaux de fond

## 1.6 Calcul du diamètre moyen

Le diamètre moyen  $d_m$  est calculé selon la formule de Mueller (1943) :

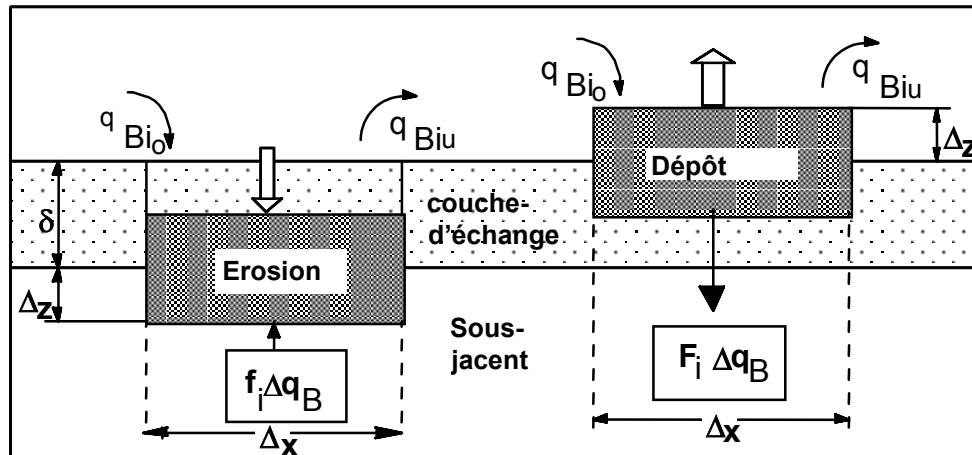
$$d_m = \sum d_i f_i$$

$d_i$  = diamètre moyen de la fraction  $i$

$f_i$  = proportion de cette fraction  $i$

## 1.7 Structure des couches

La composition verticale du fond de la rivière est caractérisée par des couches. En surface se trouve la couche de pavage, appelée aussi la couche d'échange. En dessous plusieurs couches du sous-jacent peuvent être définies. On peut ainsi reproduire la formation géologique du sous-jacent. La couche d'échange est une couche de stockage, où le bilan des processus d'échange entre le sous-jacent et le transport se fait. Le concept utilisé par le programme MORMO est basé sur une proposition de Hirano (1971).



- $qB_{i_o}$  = apport de l'amont pour la fraction  $i$  en  $[m^3/s]$  par mètre de largeur  
 $qB_{i_u}$  = transport de sédiments vers l'aval pour la fraction  $i$  en  $[m^3/s]$  par mètre de largeur  
 $f_i \Delta q_B$  = apport de sédiments depuis le sous-jacent pour la fraction  $i$  vers la couche d'échange en  $[m^3/s]$  par mètre de largeur  
 $F_i \Delta q_B$  = transport de sédiments de la fraction  $i$  depuis la couche d'échange vers le sous-jacent en  $[m^3/s]$  par mètre de largeur  
 $\Delta z$  = Changement de la cote du fond, en [m]  
 $\Delta x$  = discrétisation dans la direction de l'écoulement [m]  
 $\delta$  = épaisseur de la couche d'échange [m]

Fig. 3 Concept de la couche d'échange, selon Hirano (1971).

En cas d'érosion des matériaux dont la granulométrie correspond au sous-jacent est amené vers la couche d'échange. En cas de dépôt des matériaux dont la granulométrie correspond à celle de la couche d'échange est amené vers le sous-jacent. Le bilan des échanges de matériaux permet de calculer la répartition granulométrique de la couche d'échange.

## 2 Calcul du charriage

### 2.1 Introduction

Un modèle numérique devrait être étalonné à l'aide de variations de fond enregistrées par des relevés, ceci en variant divers paramètres. Il faut distinguer entre les paramètres du modèle (par exemple le coefficient numérique dans la formule de Meyer-Peter/ Mueller) et les paramètres spécifiques au cours d'eau (granulométrie des matériaux de fond, rugosités etc.). La modélisation part du principe que des formules développées en laboratoire peuvent être reprises selon la proposition originale et que ce sont plutôt les facteurs spécifiques au cours d'eau qui doivent être variés pour améliorer les résultats. Il va de soi que cette variation doit être contenue dans la bande des variations des valeurs mesurées.

Le charriage est le produit de processus divers, qui s'influencent mutuellement. Il n'est pas possible de considérer tous les processus. Le modèle doit cependant considérer les processus dominants. Si le charriage est dominant – c'est le cas des rivières à fond de gravier- il faut considérer en particulier la capacité de transport pour de faibles forces tractrices et la simulation de la formation d'une couche de pavage.

Le concept adopté est donc le suivant :

1. Utilisation de la formule de transport de Meyer-Peter et Mueller
2. Calcul du charriage par fractions, sur la base du principe de la 'mobilité égale'
3. Considération des variations hydrodynamiques de la force tractrice
4. modification de la formule de Meyer-Peter et Mueller Formel selon Zarn
5. Calcul de la force tractrice en fonction de la profondeur d'écoulement moyenne, considération du frottement des berges par une réduction de la largeur active
6. Considération de la formation de la couche de pavage par un concept d'une double couche d'échange

### 2.2 Formule de transport

La formule de Meyer-Peter et Mueller (1948) a été développée pour des cours d'eau à pente moyenne et fortes où le charriage domine. Elle est toujours très répandue dans son utilisation. La formule originale est:

$$\phi_{dmo} = 8 (\theta'_{dmo} - \theta_c)^{3/2} \quad \text{formule Meyer-Peter/Mueller}$$

où 
$$\phi_{dmo} = \frac{q_B}{(s-1)^{1/2} g^{1/2} d_{mo}^{3/2}}$$

et 
$$\theta'_{dmo} = \frac{\mu h_m J_i'}{(s-1) d_{mo}}$$
 force tractrice non-dimensionnelle, rapportée à  $d_{mo}$

$d_{mo} =$  diamètre moyen du sous-jacent

La largeur  $r$  active considérée pour le calcul du transport est déterminée à l'aide du rapport des coefficients de rugosité des berges et du fond.

### 2.3 Calcul du charriage par fraction

La formule de Meyer-Peter et Mueller est basé sur un seul diamètre de grain caractéristique. Afin de considérer les phénomènes de tri granulométrique et de pavage, le passage d'un modèle à granulométrie uniforme à un modèle de calcul par fraction est obligatoire. Les intensités calculés pour chaque fraction dépendent d'une fonction de masquage qui sera introduite dans la formule de transport. Le programme MORMO utilise la procédure développée par Hunziker (1995). Celle-ci est basée sur le principe que la couche d'échange règle la mobilité des différentes fractions. En particulier, pour des conditions d'équilibre le réglage permet d'obtenir l'identité entre les matériaux charriés et le sous-jacent.

$$q_B = \sum_{i=1}^n q_{Bi} \quad \text{Capacité de transport du mélange}$$

$$\phi_{dms,i} = F_i 5 (\phi_i (\theta'_{dms} - \theta_{cm}))^{3/2} \quad \text{formule de Meyer-Peter, modifiée par Hunziker pour le calcul par fraction}$$

avec 
$$\phi_{dms,i} = \frac{q_{Bi}}{(s-1)^{1/2} g^{1/2} d_{ms}^{3/2}}$$

et  $\theta_{cm} = \theta_{ce} \left( \frac{d_{mo}}{d_{ms}} \right)^{0.33}$  force tractrice non-dimensionnelle critique du mélange

et  $\theta_{ce} = f(Re^*)$  force tractrice non-dimensionnelle critique de matériaux uniformes.

et  $\theta'_{dms} = \frac{\mu R_b J_1'}{(s-1) d_{ms}}$  force tractrice non-dimensionnelle rapportée à  $d_{ms}$

$$\varphi_i = \left( \frac{d_i}{d_{ms}} \right)^{-\alpha}$$

fonction de masquage

avec  $\alpha = 0.011 \cdot \theta_{dms}^{-1.5} - 0.3$  exposant de la fonction de masquage

## 2.4 Considérations des variations hydrodynamiques de la force tractrice

En fonction de la turbulence les forces tractrices ne sont pas constantes, mais oscillent autour d'une valeur moyenne. Ce phénomène joue un rôle particulier pour le cas de débits faibles, lorsque les valeurs maximales de la force tractrice sont plus grandes que la valeur critique pour le mouvement, les valeurs minimales plus faibles. Ainsi, des débits faibles peuvent encore contribuer au transport et la fonction de transport donnée par les formules connues doit être modifiée dans ce domaine. Cette modification est non-négligeable parce que malgré les intensités faibles la durée effective du transport augmente.

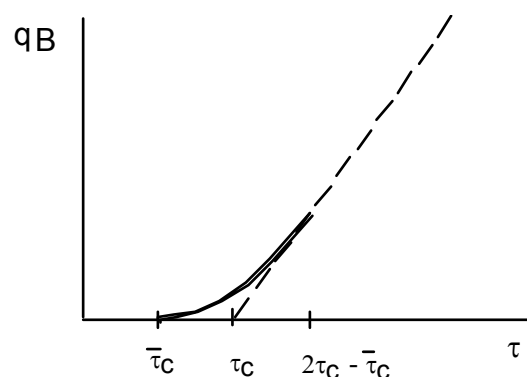


Fig. 4 Modification de la fonction de transport pour considérer les variations hydrodynamiques de la force tractrice

Une formule donnée par Pazis et Graf (1977) permet de directement modifier la fonction de transport..

$$\phi_B = f(10^\alpha \theta^{8.15})$$

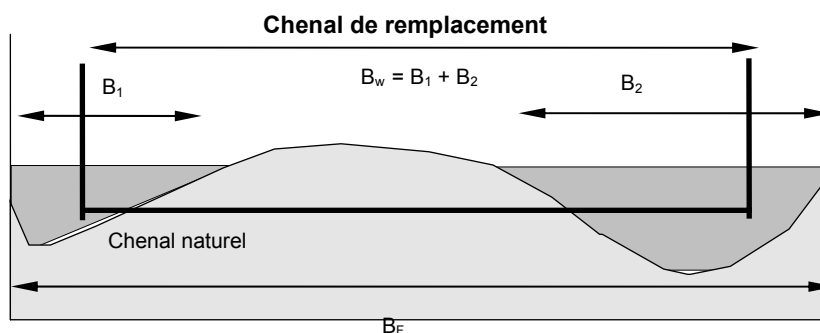
Cette fonction s'adapte à celle donnée par la fonction de Meyer-Peter et Mueller. dans le domaine

$$\tau = 2\tau_c - \bar{\tau}_c$$

## 2.5 Profils avec des bancs et des cuvettes d'affouillement, chenaux en tresse

En principe la formule de Meyer-Peter et Mueller a été développée pour le cas de fonds plats. En présence de bancs alternés ou dans le cas de chenaux en tresse l'écoulement se concentre dans des chenaux partiels dont la capacité de transport peut dévier fortement d'une valeur calculée à partir d'une profondeur d'eau moyenne.

La procédure développée par Zarn (1997) qui a été intégrée dans le programme MORMO tient compte de ces variations. Elle introduit un chenal rectangulaire de remplacement à fond plat. La sinuosité de l'écoulement est considérée par une formule et l'on admet ensuite des conditions d'écoulement uniforme. Une autre formule tient compte des pertes de formes. La force tractrice non-dimensionnelle est calculée ( $\theta_{\text{chenal de remplacement}}$ ). La largeur active réduite  $B_G$  de ce chenal de remplacement - plus faible que la largeur  $B_W$ ) doit être calculée par une correction ( $\theta_{\text{correction}}$ ). La fig. 5 illustre la procédure de Zarn.



$B_F$  = Largeur de la rivière

$B_W$  = Largeur totale des chenaux partiels actifs = largeur du chenal de remplacement

Fig. 5 Concept de Zarn (1997)

### 3 Références

Einstein, H.A., Der hydraulische oder Profil-Radius, Schweizerische Bauzeitung, Band 103, Nr. 8, 1934

Hirano, M., River Bed Degradation with Armoring, Transactions of JSCE, Vol. 3, Part 2, 1971

Hunziker, R., Fraktionsweiser Geschiebetransport, Mitteilung Nr. 138 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, 1995

Meyer-Peter, E., Müller, R., Formulas for Bed-Load Transport, Second Meeting IAHR, Stockholm, 1948

Müller, R., Theoretische Grundlagen der Fluss- und Wildbachverbauungen, Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, ETH Zürich, Nr. 4, 1943

Strickler, A., Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen, Mitteilung Nr. 16 des Amtes für Wasserwirtschaft, Eidgenössisches Departement des Innern, Bern, 1923

Pazis, G.C., Graf, W.H., Weak Sediment Transport, Journal of Hydraulics Division, Proc. of the ASCE, Vol. 103, No. HY7, 1977

Zarn, B., Einfluss der Flussbettbreite auf die Wechselwirkung zwischen Abfluss, Morphologie und Geschiebetransportkapazität, Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, 1997