

Table Ronde Enrochement

Régions
Midi-Pyrénées,
Languedoc-Roussillon
et Aquitaine



Argelès-Gazost, mercredi 23 avril 2014

LES TRAVAUX D'ENROCHEMENTS SUITE AUX CRUES TORRENTIELLES D'OCTOBRE 2012 ET JUIN 2013

David SABATIER RTM 64-65



*Barèges crue du 18 juin 2013
secteur aval Barzun*



*Soulom crue du 18 juin 2013
centre ville soulom*

LES TRAVAUX D'ENROCHEMENTS SUITE AUX CRUES TORRENTIELLES D'OCTOBRE 2012 ET JUIN 2013



- 1- L'organisation post crue et la mission du RTM
- 2- La spécificité des crues torrentielles
- 3- Les causes de ruine des ouvrages de protection de berge
- 4- La conception des ouvrages de protection de spécifiques aux cours d'eau torrentiels *(choix de la section hydraulique, dimensionnement de l'ouvrage, stabilisation du fond de lit)*
- 5- Exemple de mise en oeuvre

1- L'organisation post crue et la mission du RTM

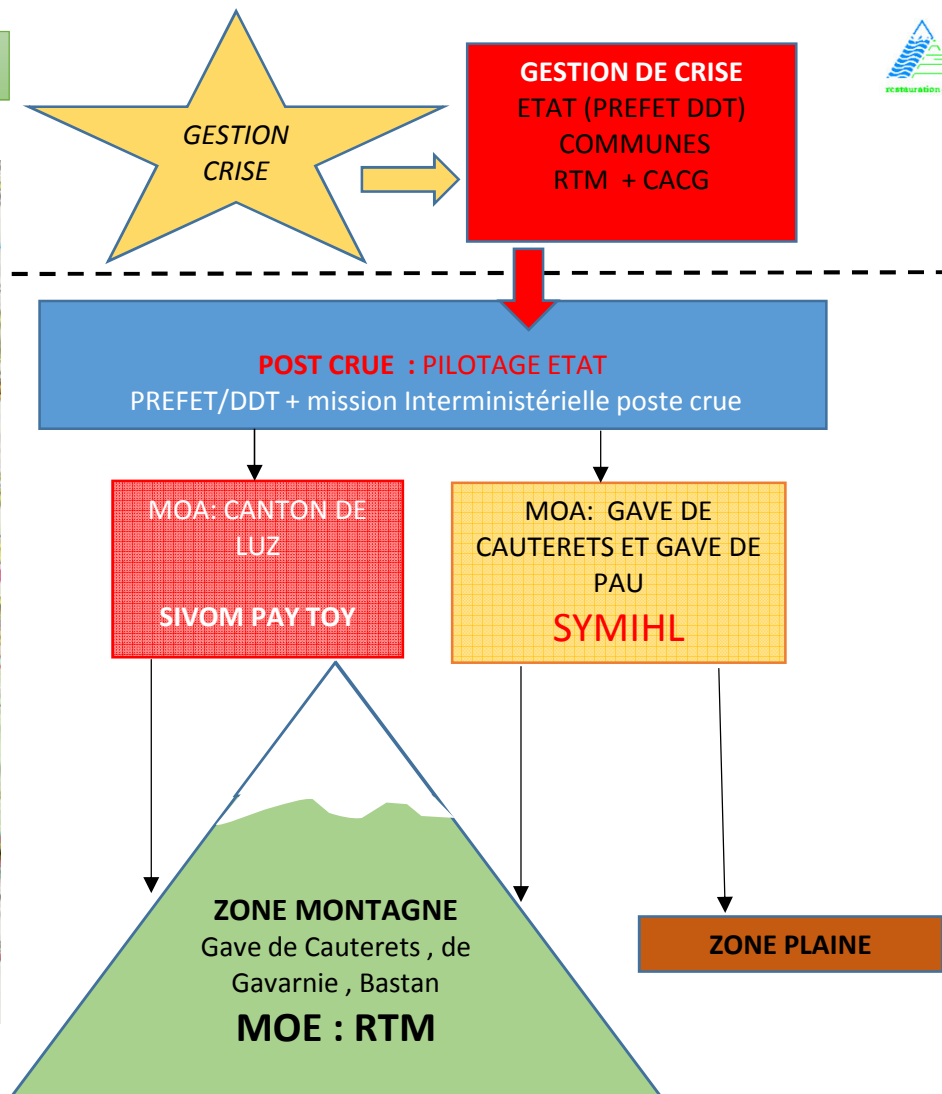
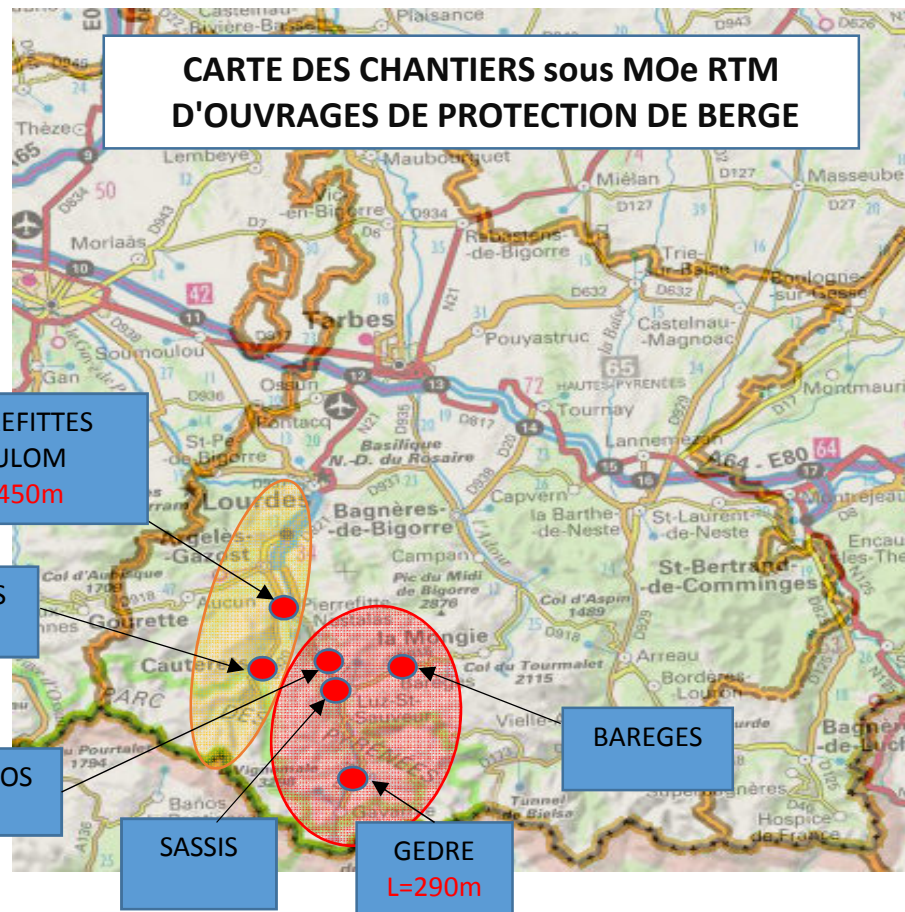
Pendant la crise et durant les jours qui ont suivi l'événement 18 juin 2013 le service RTM a participé à la mise en oeuvre de travaux d'urgence de terrassement afin de rétablir le gabarit hydraulique des cours d'eau et mettre en sécurité les biens et les personnes.

Par la suite, dans le cadre de la reconstruction post crue, le RTM a reçu comme mission de **chiffrer (APS)** , puis de **réaliser et mettre en oeuvre les projets hydrauliques de confortement** des berges impactées en zone montagne.

Le RTM intervient sous pilotage Etat (principal financeur MEDDE et MAAF) et **pour le compte de deux Maitre d'ouvrage** distincts: **le SIVOM du Pays TOY** (canton de Luz st Sauveur) et **le SYMIHL** (Canton d'Argelès).

A noter que le RTM était déjà intervenu comme maitre d'oeuvre pour le compte du SYMIHL suite à la crue d'octobre 2012.

1- L'organisation post crue et la mission du RTM



2- La spécificité des crues torrentielles

Nous insistons sur **le caractère torrentiel des écoulements (écoulements turbulents)** qui surviennent sur ces cours d'eau et sur les **nombreuses spécificités hydrauliques** que cela impose:

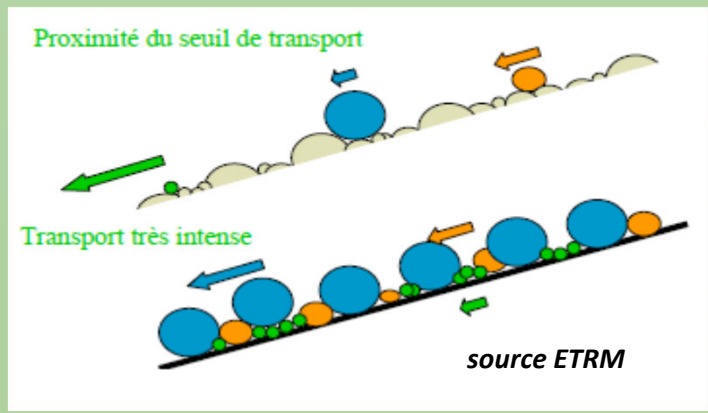
De nombreux facteurs influent sur le comportement des torrents,

- **le transport solide,**
- **les flottants,**
- **les changements de pente,**
- **et donc le profil en long des cours d'eau. Ce dernier étant plus ou moins stable en fonction de la maturité ou non des cônes de déjection.**

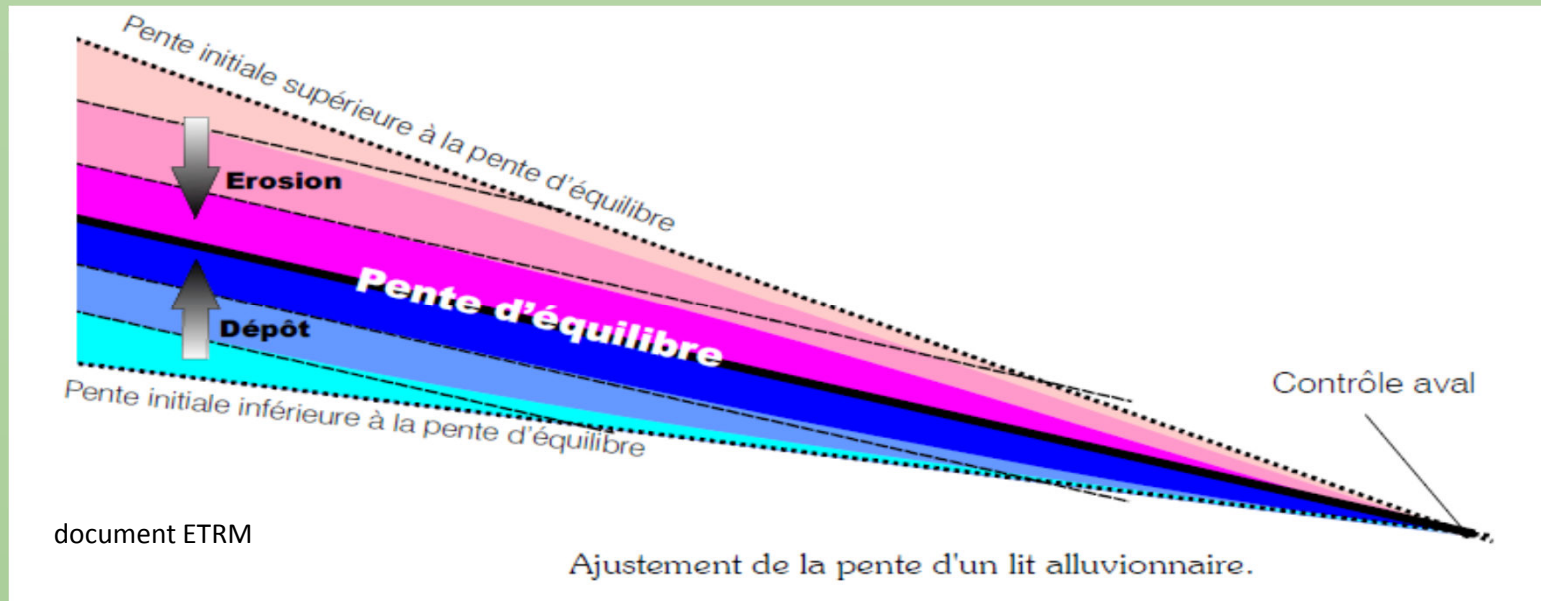
Le potentiel destructeur de la crue torrentielle dépendra de plusieurs facteurs:

- En premier lieu **la durée de la crue et le volume de matériaux charriés** par le torrent.
- **Le débit de pointe**, évidemment, que l'on peut associer à **l'occurrence de la crue** (décennale, cinquanteennale, centennale ou exceptionnelle),
- Le volume de matériaux charriés joue un rôle direct sur **le caractère morphogène d'une crue** (incision en zone de forte pente, dépôt massif et divagation importante et destructrice en zone de replat, là où se trouvent généralement les enjeux les plus forts).

2-1 Le transport solide



2-2 La pente d'équilibre



L'énergie du torrent pour transporter des matériaux est directement **proportionnel** au débit liquide mais aussi à la pente du lit du torrent. **Plus l'énergie (et donc la pente) est importante, plus la quantité de matériaux transportés (débit solide) est élevée.**

- Si la pente du lit est supérieure à la pente d'équilibre => trop d'énergie => incision du lit => aplatissement de la pente => affouillement des fondations des ouvrages de protection de berge
- Si la pente du lit est inférieure à la pente d'équilibre => pas assez d'énergie pour entrainer le charriage des blocs => dépôt d'une partie des blocs => accroissement de la pente et réhausse du lit qui peut le cas échéant effacer une partie des protections de berge et provoquer le débordement du torrent

3- les principales causes de ruine des ouvrages en torrentielles

Modification de la pente d'équilibre du fond de lit qui entraîne

- par **incision** du fond du lit: l'affouillement des fondations des ouvrages et leur basculement dans le lit
- par **engravement** du lit: la submersion de l'ouvrage et sa destruction par l'arrière

Débâcles et déviation du flux à cause des flottants, entraînant au droit de l'ouvrage une augmentation soudaine des vitesses de coulement.

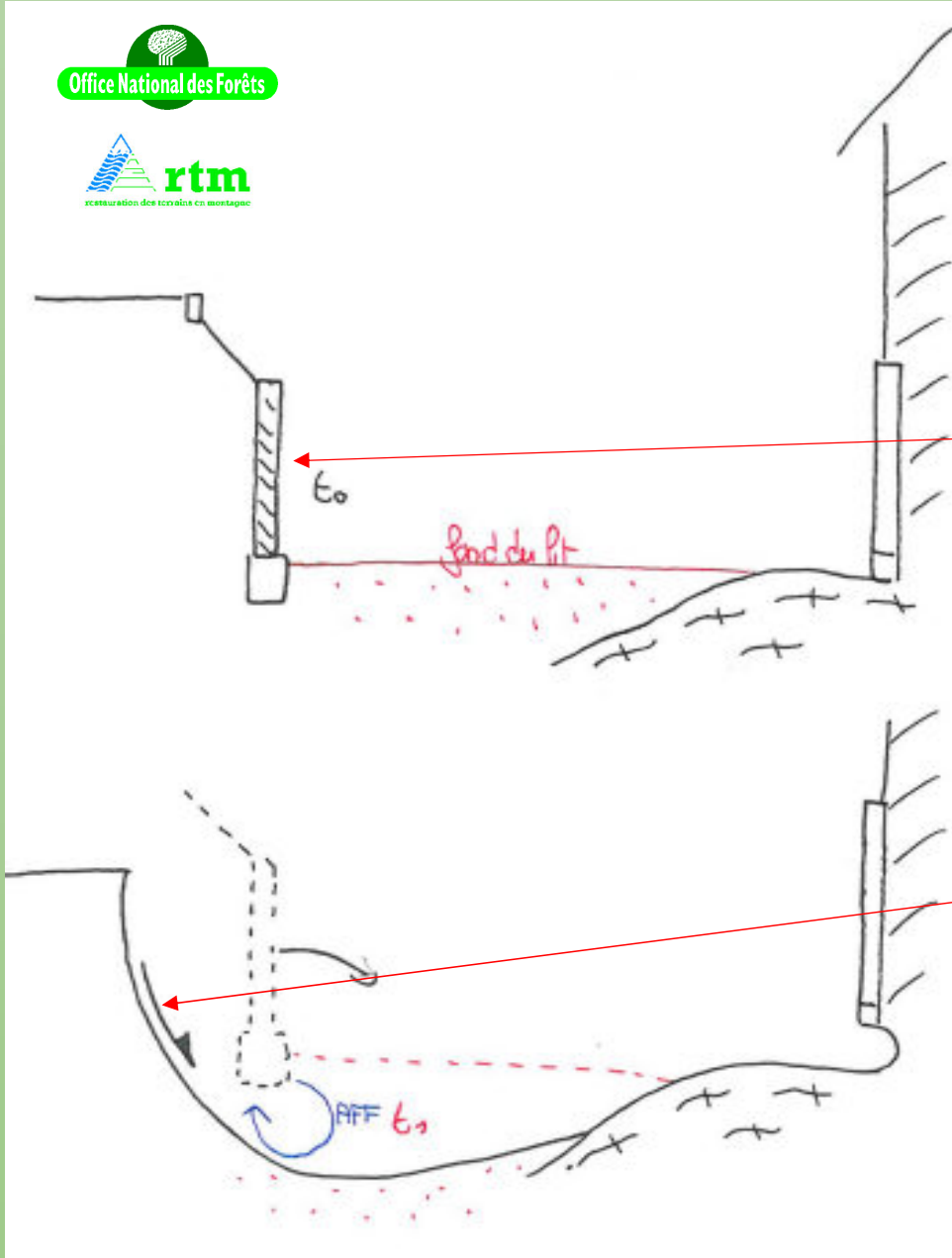
Section hydraulique trop étroite augmentant ainsi les forces tractrices le long de l'ouvrage et les risques d'incisions du fond du lit.

Mauvaise conception: Absence de drainage de l'ouvrage (=> poussée hydrostatique), mauvais dimensionnement, non prise en compte des contraintes géotechniques.

Pathologie des ouvrages : des bétons, et/ou des enrochements qui constituent l'ouvrage (gel)

Mauvaise mise en oeuvre: non respect des différentes étapes de construction, bétonnage en eau sans adjuvant, granulométrie des blocs trop faibles, en particulier dans les ouvrages par-fouille en blocs libres...

3-1 Affouillement des fondations

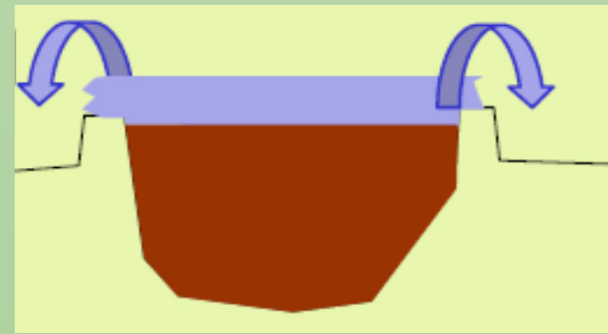


3-2 L'engravement et effacement de la protection

effet guide d'eau de la protection surversée (Pierrefittes)



entonnement trop contraint du lit => perte de charge + dépôts à l'amont => effacement de la protection et divagation brutale du torrent
(Luz St Sauveur place du 8 mai et thermes de Barzun Barèges)



4- La conception des ouvrages de protection de berge et leurs spécificités liées aux crues torrentielles

Choix de la section hydraulique, dimensionnement de l'ouvrage, stabilisation du fond de lit

Les ouvrages devront être dimensionnés pour se prémunir contre des crues torrentielles à caractère morphogène. Ce type d'événements majeurs, seront les seuls à être capables de déstabiliser le profil en long d'un torrent. Ainsi il conviendra de réaliser des ouvrages visant à :

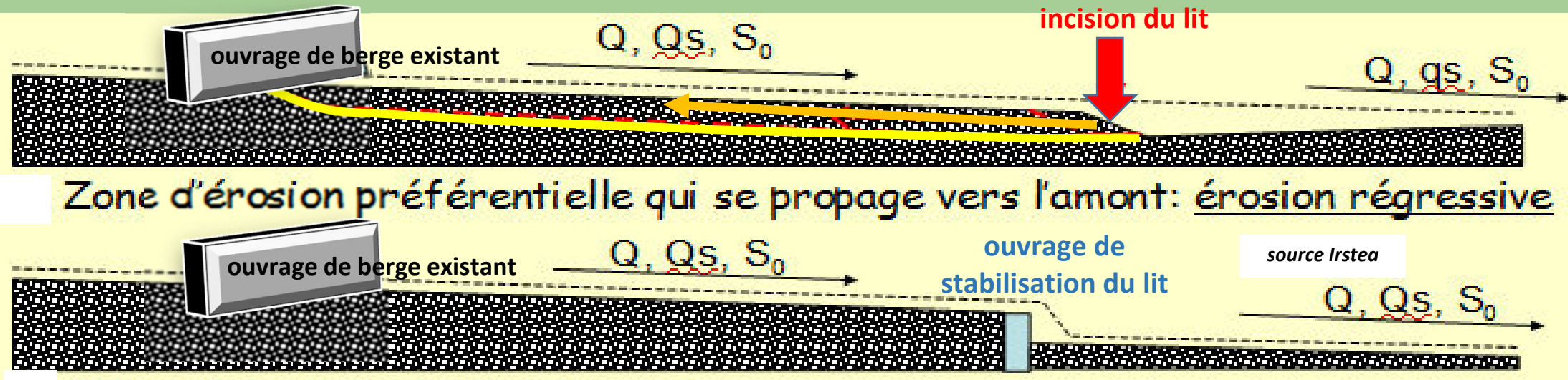
- stabiliser le profil en long,
- résister aux affouillements,
- aménager le lit pour stocker des matériaux
- créer des zones de divagation en plaine tout en préservant les enjeux.

4-1 Ouvrage de stabilisation du fond du lit : **les seuils**

Avant tous dimensionnement des protections de berge, la pente d'équilibre du torrent doit être redéfinie à l'aide d'une analyse hydraulique du profil en long du torrent .

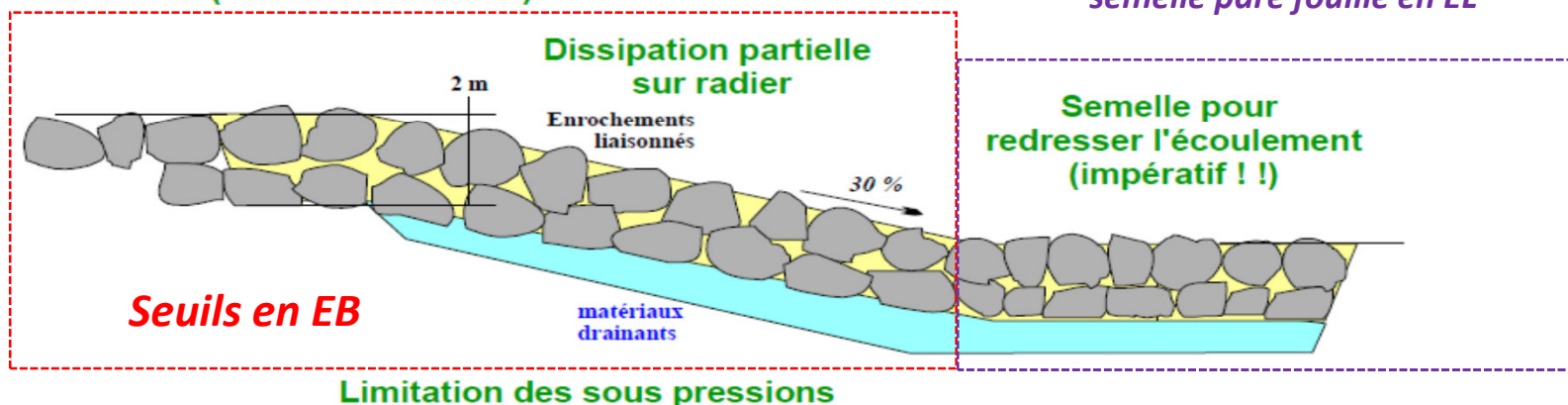
Il convient donc de mettre en place des ouvrages visant à exhausser le lit lors d'abaissement important dans le but de **limiter les phénomènes d'érosion régressive**. Des seuils et un pavage de fond qui n'existaient pas avant la crue devront ainsi être mis en place pour **rétablir le profil en long initial** de l'ouvrage, **stabiliser son profil en long**, et **retrouver une fonctionnalité identique** d'avant crue.

De même, les ouvrages de protection de berges, situés le long du lit incisés, devront être replacés et accompagnés de fondations, reposant sur un lit plus bas que celui d'avant la crue. Ces ouvrages seront par conséquent plus hauts, pour la même fonctionnalité de protection de la berge. Ils nécessiteront la mise en oeuvre d'une technique de construction différente, intégrant l'ensemble des facteurs qui ont été modifiés suite à la crue.

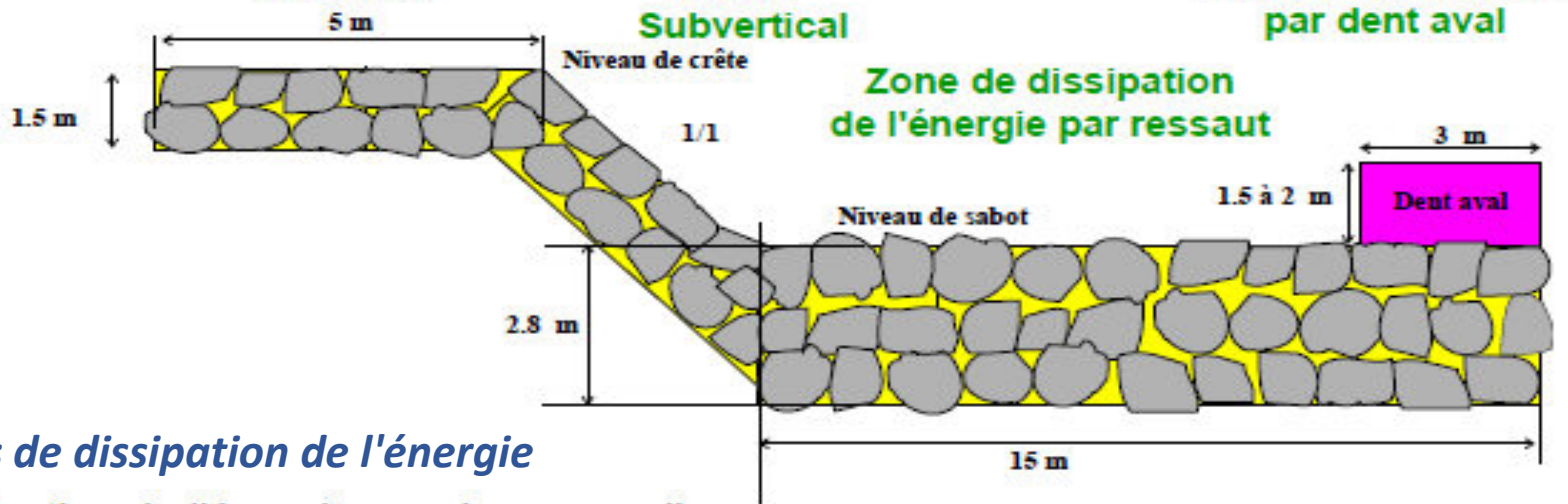




Prévention de l'affouillement en amont (écoulement fluvial)



Prévention de l'affouillement en amont



Seuils de dissipation de l'énergie

- Dissipation de l'énergie sur chaque seuil
- Redistribution des vitesses dans la section
- Ouvrage très massif

Cotes purement indicatives

4-2 Ouvrage de stabilisation du fond du lit: **le sabot parefouille**

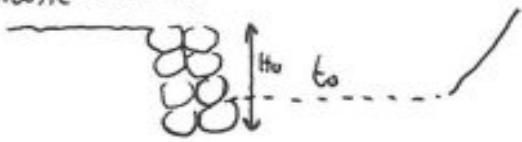
Par retour d'expérience des deux crues successives d'octobre 2012 et juin 2013 on a pu constater que la plupart des ouvrages bétonnés, digues mur maçonnés, ou enrochement libres, endommagés ou ruinés par les crues d'octobre 2012 et juin 2013, l'ont été par **affouillement de leurs fondations** parfois peu profondes.

L'absence de sabot pare-fouille a été un facteur qui a accru de manière significative la vulnérabilité des ouvrages face à l'incision du lit. Ainsi, il est vivement recommandé de mettre en oeuvre un tel système constitué d'une excavation située en avant de l'enrochement.

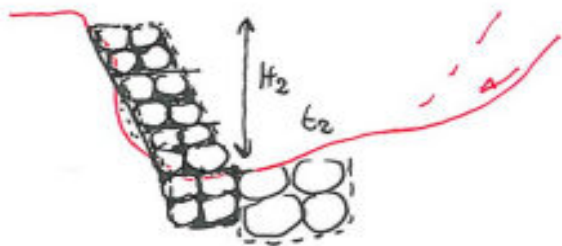
L'enchâssement de plusieurs rangées de blocs libres en avant de l'ouvrage permet en cas d'abaissement du fond du lit de remobiliser ces blocs et d'empêcher, par écran amovible, l'affouillement de la fondation de l'ouvrage.

Dans le cas d'affouillement prévisible important (>2.50m) il sera envisagé de réaliser un sabot d'une largeur correspondant 1.5 fois la profondeur d'affouillement retenue. Le sabot est constitué de 2 à 3 rangées de blocs libres de granulométrie comprise entre 900mm et 1500mm

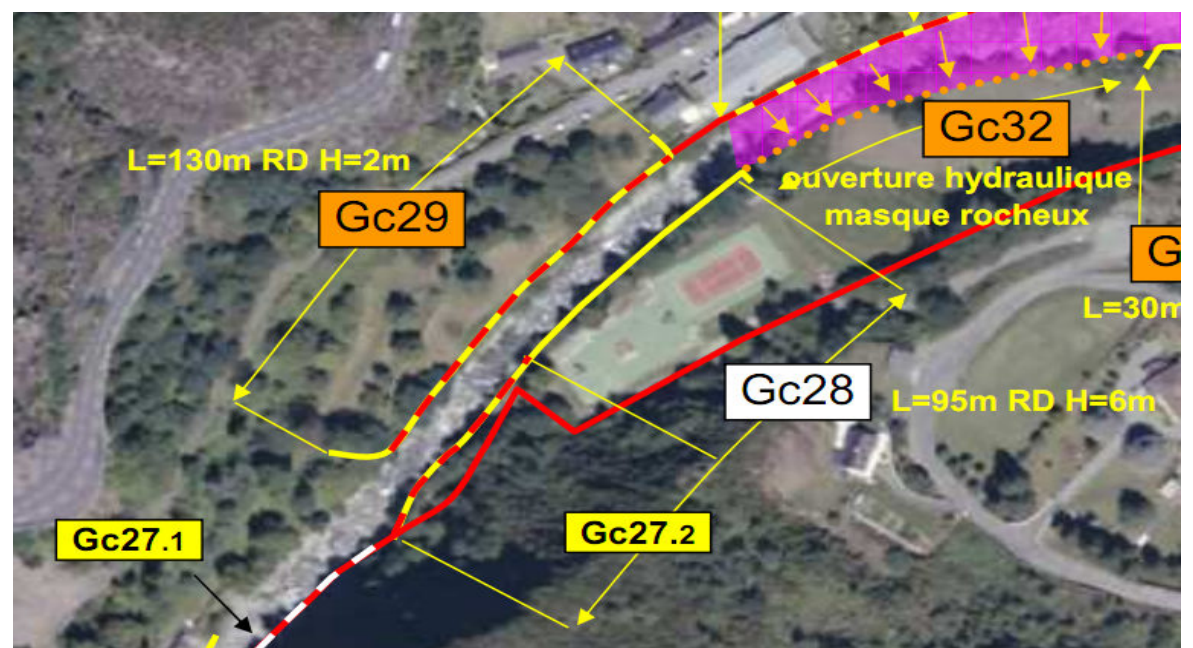
parcelle sondée



Enrochement libre détruit par crue oct 2012

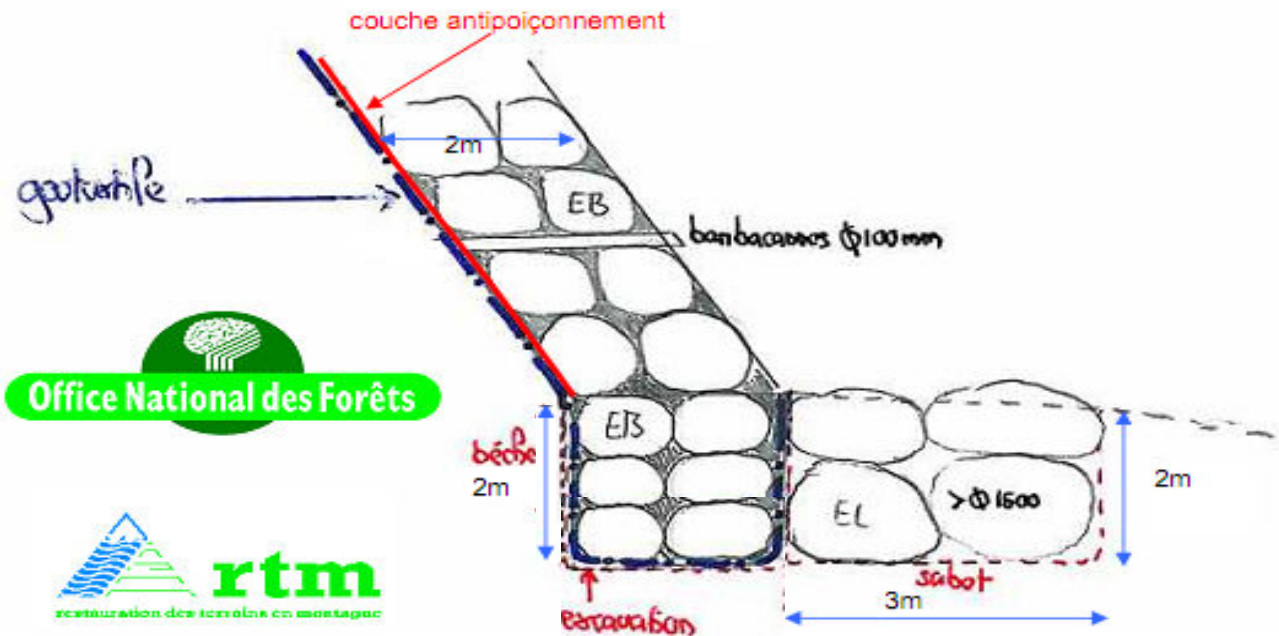


$$H_2 > H_0$$



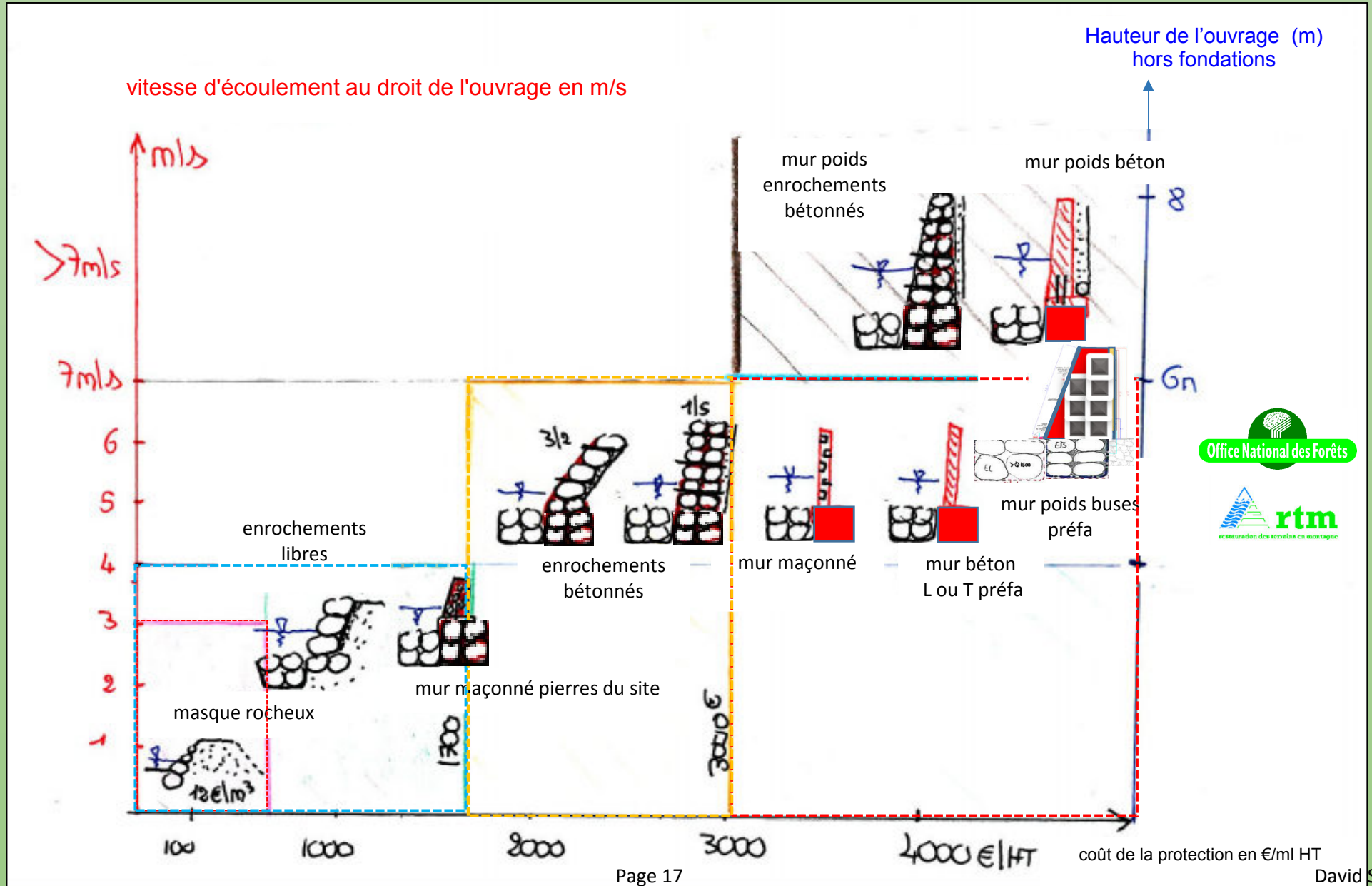
Office National des Forêts

rtm
restauration des territoires en montagne



4-3 Le dimensionnement des ouvrages en enrochements pour la protection des berges

Les principaux ouvrages utilisant des blocs et mis en oeuvre suite aux crues torrentielles d'octobre 2012 et juin 2013 sont présentés dans le tableau suivant. Le type d'ouvrage varie en fonction de la vitesse de la pente du talus, de la hauteur de protection et du coût actuel de mise en oeuvre en zone montagne.



Office National des Forêts

rtm
restauration des terrains en montagne

4-3-1 Choix de la technique de reconstruction des enrochements

Le choix de la technique de reconstruction des protections de berge, et plus particulièrement du choix entre enrochements libres et enrochements bétonnés ou liaisonnés par béton projeté, dépend:

Du retour d'expérience: On a pu constater que la quasi totalité des ouvrages en enrochements libres qui étaient présents sur le Gave de Cauterets ont disparu ou ont été fortement endommagés par la crue d'Octobre 2012. Il en est de même pour ceux qui étaient situés le long du Bastan.

Du choix de la section hydraulique : Le choix d'un parti d'aménagement retenant un $L/H > 15$ est de nature à limiter les force tractrice sur les ouvrages de berges.

Des possibilités qu'aura une pelle mécanique de mettre en oeuvre des blocs d'un certain tonnage sur des sites parfois peu accessibles ou sur des hauteur d'ouvrage importante.

De la hauteur de l'ouvrage: On distinguera enfin, les ouvrages de forte hauteur (supérieur à 5m), pour lesquelles il y aura nécessité d'opter pour des murs poids ancrés par une bêche qui permettra d'éviter tous risques de basculement et d'affouillement. L'ensemble de ces ouvrages nécessitent la réalisation d'un sabot pare-fouille.

Choix de la technique de reconstruction des enrochements (suite)

La taille requise des blocs pour construire cet enrochement. Pour déterminer la dimension des blocs, une des approches possible est celle de la formule d'Isbash, qui donne le diamètre médian des blocs pour une protection en enrochements sur fond plat en fonction du carré de la vitesse du courant au voisinage du revêtement (écoulement faiblement turbulent).

Pour les enrochements posés sur un talus, le coefficient dit de Lane amène un facteur correctif. Ainsi, plus l'angle du talus est couché, plus la taille des blocs sera augmentée par le facteur de Lane qui tiendra compte de la composante tangentielle liée à la pente inclinée sur laquelle le bloc est posé.

A titre d'illustration pour un talus penté à 34° (3B/2V) et une vitesse de 7m/s on obtient un diamètre de 1.83m soit des blocs de 15.9T à utilisé pour la construction de l'enrochement.

La taille requise des blocs pour construire cet enrochement. Pour déterminer la dimension des blocs, nous appliquons la formule d'Isbash qui donne le diamètre médian (d) des blocs pour une protection en enrochements sur fond plat en fonction de la vitesse (U) du courant au voisinage du revêtement (écoulement faiblement turbulent). On prendra le cas de $U=7\text{m/s}$

$$d = 0,7 \cdot \frac{\gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} \cdot \frac{U^2}{2g} \qquad d = 0,7 \cdot \frac{\gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} \cdot \frac{U^2}{2g} = 0,7 \times \frac{1000}{2600 - 1000} \times \frac{7^2}{2 \times 9,81} = 1.092\text{m}$$

Pour les enrochements posés sur un talus, ce qui est notre cas en protection de berge, E.W Lane propose de diviser le diamètre précédent (calculé pour un fond plat) par le facteur suivant :

$$\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \beta}{\sin^2 \varphi}} \text{ où } \beta \text{ est l'angle du talus avec l'horizontale et } \varphi \text{ l'angle d'équilibre limite des}$$

enrochements sans écoulement.

Par sécurité, l'angle φ est assimilé à l'angle de repos compris entre 37° et 45° pour des enrochements, une valeur moyenne de 40° est retenue.

Plus l'angle β du talus est couché plus la taille des blocs sera augmenté par le facteur de Lane qui tiendra compte de la composant tangentielle lié à la pente inclinée sur laquelle le bloc est posée.

Pour l'opération G20 concernant Sassis en prenant en compte des vitesses de 7m/s qui s'exerce localement en extrados de ménadre et une pente de talus à conforter assimilable à $3/2$ (33.7°)

le valeurs, du facteur correctif vaut donc $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(\sin 33,7^\circ)^2}{(\sin 40^\circ)^2}}} = 1,98$

Donc avec un talus à $2V/3H$, le diamètre moyen des blocs de la protection est donc $d = 1,98 \times 1.092 = 2.16 \text{ m}$.

Si l'on choisit d'exprimer cette spécification en diamètre nominal (arrête d'un bloc cubique de même volume) et non en diamètre moyen ellipsoïdal, cette valeur est obtenue en multipliant par un facteur de $0,85$; soit $d_{\text{nominal}} = 1,83 \text{ m}$, (volume de 6.13m^3) ce qui correspond à un bloc de 15.9 T environ.

Une dimension et un tonnage aussi important pour un bloc, impose donc de retenir la construction de la protection en enrochements bétonnés.

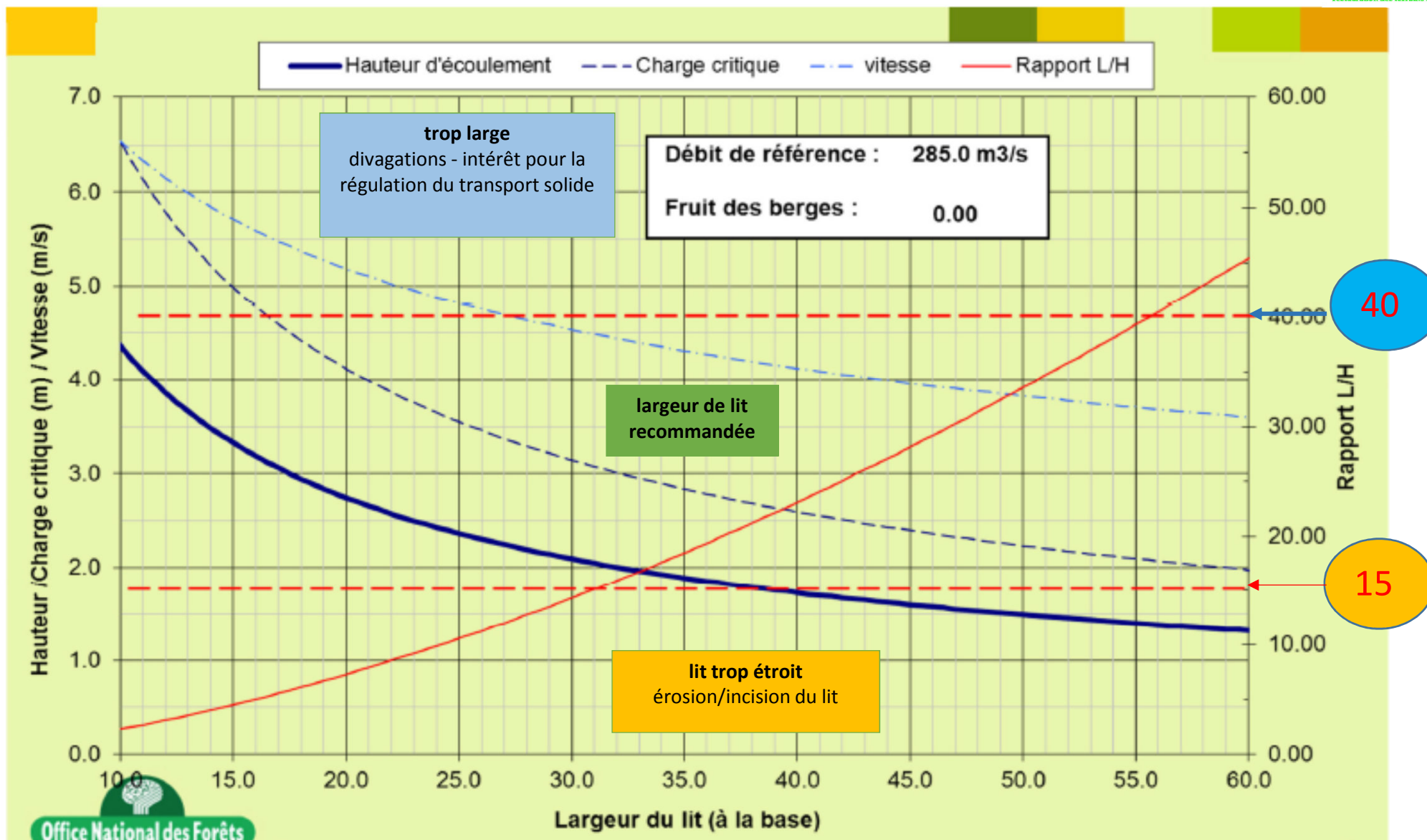
EXEMPLE DE CALCUL

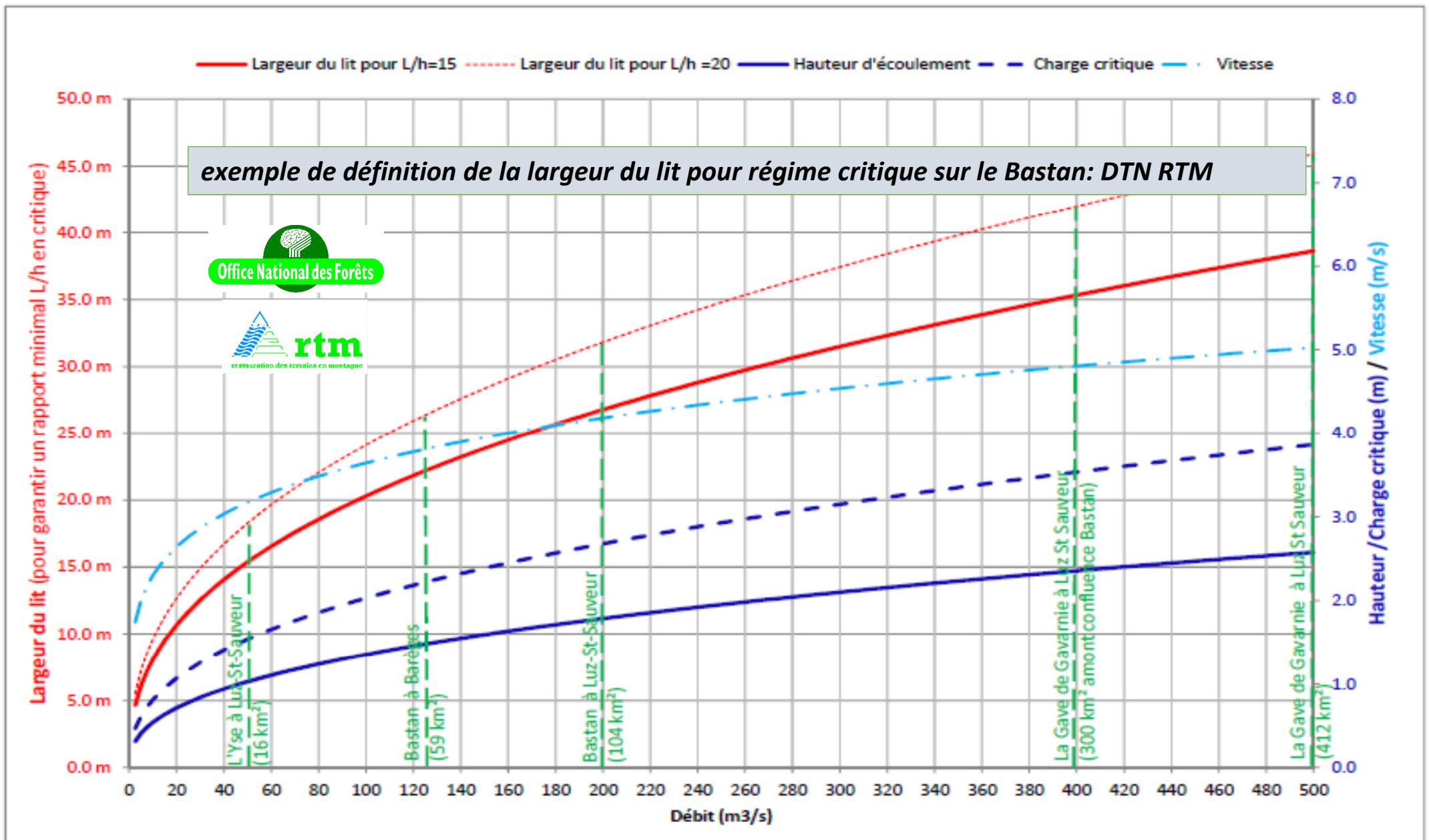


Spécificité de l'hydraulique torrentielle :

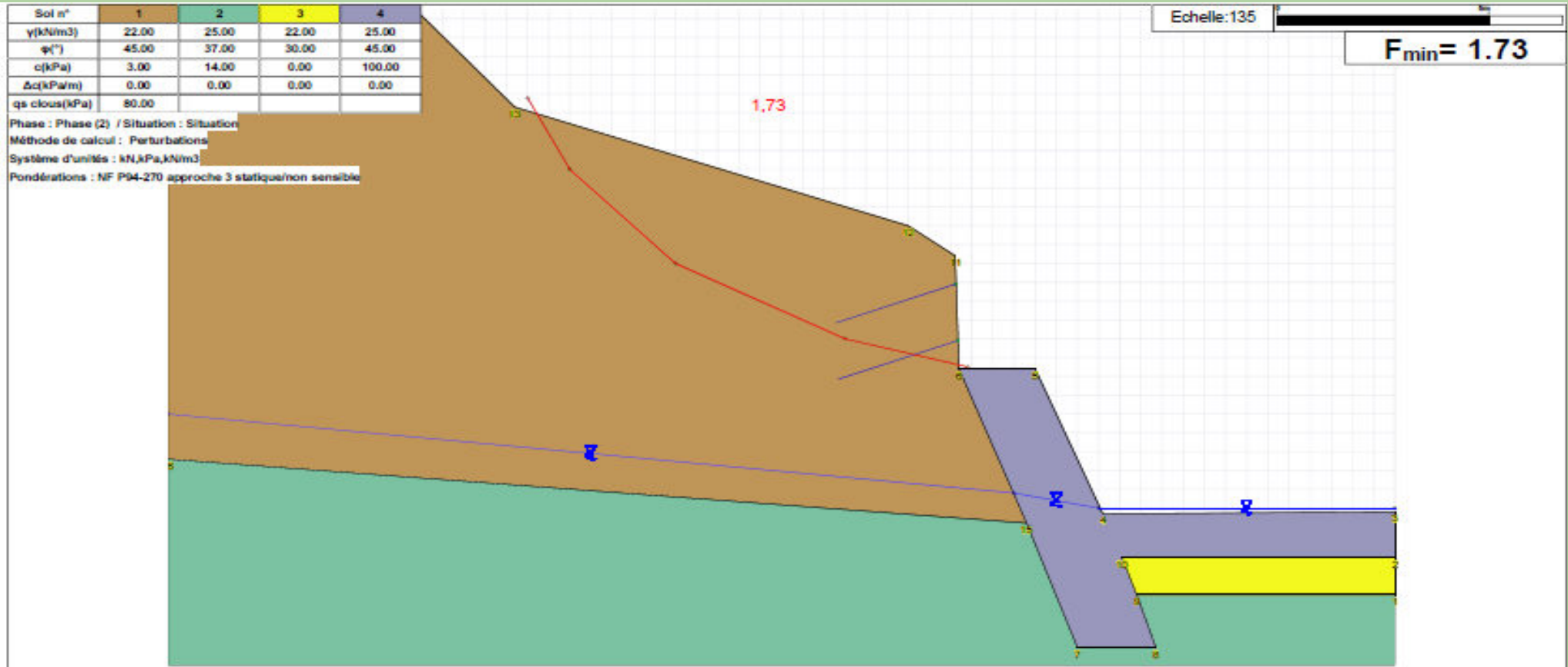
le RÉGIME CRITIQUE

exemple pour le Gave de Cauterets à Pierrefite Soulom (E EBRARD RTM66)





4-3-3 Dimensionnement géotechnique : Exemple d'un calcul de stabilité d'un mur en enrochement bétonné (calcul Talren)



calcul G2 stabilité ouvrages RvD hopital militaire à Barèges (Bastan) :
Cete Mediterranée LRPC AIX en Provence

- 1 Moraine
- 2 Form glaciaire bleue
- 3 Base drainante
- 4 enrochement béton...

TALREN 4 v2.0.4

xxxxxx / Barèges - profil 12a - PROJET
 C:\...\Barèges_Profil_12a_PROJET.prj

Etude réalisée par :
CETE MEDITERRANEE
 Imprimée le : 17/03/14 à 13:01:30

4-3-4 Les composants de l'ouvrage : Les exigences du RTM requises pour les blocs

Stock tampon à proximité immédiate du site des travaux. Le contrôle des fournitures aura lieu sur ces stocks. Identification des stock en cas de provenance multiple.

Taille des enrochements: Les enrochements utilisés pour les ouvrages bétonnés seront de classe supérieure à 2000 kg

Les enrochements libre constituant le masque rocheux seront issus du site des travaux et pourront être de classes comprises entre 500 kg et 2000 kg. Une tolérance de 10% sera admise si elle n'excède pas 5% de la population des blocs

La blocométrie sera spécifiée par le diamètre équivalent ou poids moyen (qui devra être atteint ou dépassé pour au moins 50% des blocs) et par les diamètres ou poids extrêmes. Une pelle mécanique pourra être équipée d'un peson après validation par le Maître d'Oeuvre.

La réception des tailles d'enrochements sera prononcée sur site. Les blocs fissurés ou cassés durant le transport seront écartés

Courbe granulométrique

Les enrochements devront avoir une courbe granulométrique de manière à obtenir le ratio suivant : $d_{85}/d_{10} = 1,5$

Aplatissement

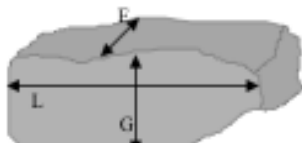
Les enrochements devront avoir un aplatissement limité

Principales caractéristiques dimensionnelles :

L : plus grande longueur,

G : plus grande dimension perpendiculaire à L

E : plus grande dimension dans le plan perpendiculaire à celui dans lequel ont été mesurés L et G.



L'aplatissement est caractérisé par le rapport dimensionnel $\frac{L+G}{2E}$. On spécifie : $\frac{L+G}{2E} \leq 2,5$



Les exigences du RTM requises pour les blocs

Poids volumique

Les enrochements devront avoir un poids volumique minimal de 25KN/m³. La mesure du poids volumique sera conforme à la norme NF-P18-554.

Fissuration : La fissuration des enrochements sera caractérisée par l'indice de continuité de la roche Ic. Pour des enrochements calcaires Ic devra être égale à 55 et pour des roches métamorphiques ou magmatiques il devra être égal à 75.

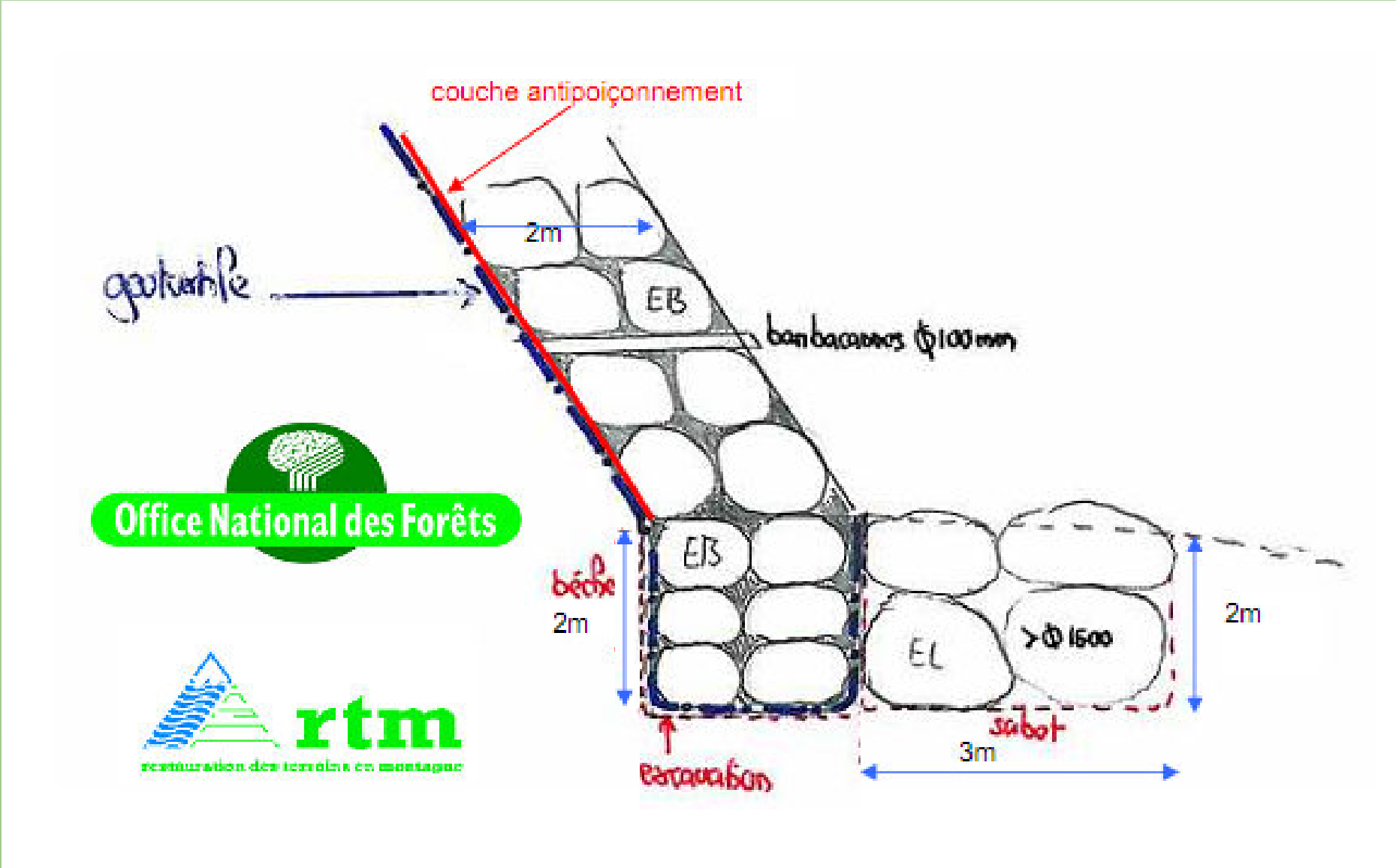
Résistance à l'usure: La résistance à l'usure des enrochements caractérisée par l'essai Deval humide (DH). La norme applicable est NF-P18-577. **On vise un MDE < 20**

Résistance aux chocs: Sur demande du Maître d'oeuvre il pourra être effectué des tests de chute de blocs sur la granulométrie spécifiée pour le chantier. Ces tests seront effectués en carrières à la charge de l'entrepreneur. le résultat des tests sera corrélé à l'Ic.

Gélimité: La porosité de la roche devra être inférieure à 5%. En cas d'enrochement calcaire la porosité de la roche sera ramener à 2%. **Le coefficient d'absorption devra être inférieur à 0,5,%**
L'entreprise à la demande du Moe pourra fournir des Essais de cycle gel/dégel, en adaptant le protocole décrit pour les granulats dans la norme NF-P18-593 (les essais seront effectué sur des éprouvettes).
Essais de résistance au gel par cristallisation du sulfate de sodium selon la norme NF-P18-594.

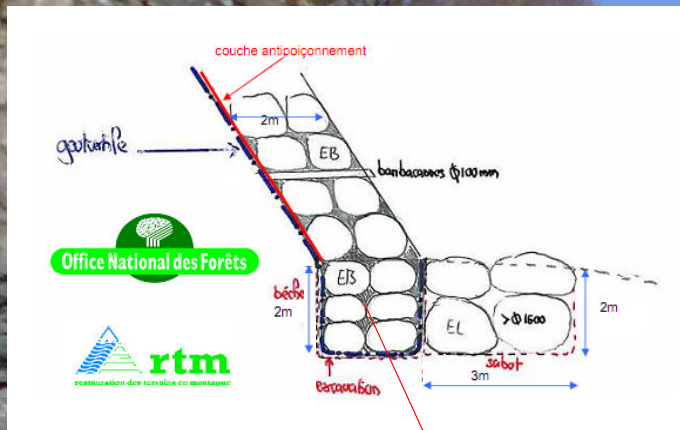
Eau agressive :En cas d'eau de rivière agressive (eaux très pures ou riches en sulfate il conviendra d'éviter l'emploi d'enrochements calcaires

Coupe type de la plus part des ouvrages préconisés par le RTM suite aux crues torrentielles des Hautes-Pyrénées



MISE EN ŒUVRE : Points importants

- Disponibilité de blocs adéquats
- Capacités adaptées des engins de chantier
- Qualité du sol support
- Présence d'eau et position des engins
- Phasage des travaux
- Contrôles
- **Savoir faire du pellicier**



Bèche en béton cyclopéen
(réutilisation des blocs du site de grande taille)



LES PHASES DE REALISATION DE L'ENROCHEMENT BETONNE

- 1 - Excavation de la bèche**
- 2 - Remplissage par blocs de forte granulométrie**
- 3- bétonnage (vibré) de la bèche**

Chantier SIVOM pays Toy MOe RTM : Barèges /Sers

**Barbacanes
D=100mm**



LES PHASES DE REALISATION DE L'ENROCHEMENT BETONNE

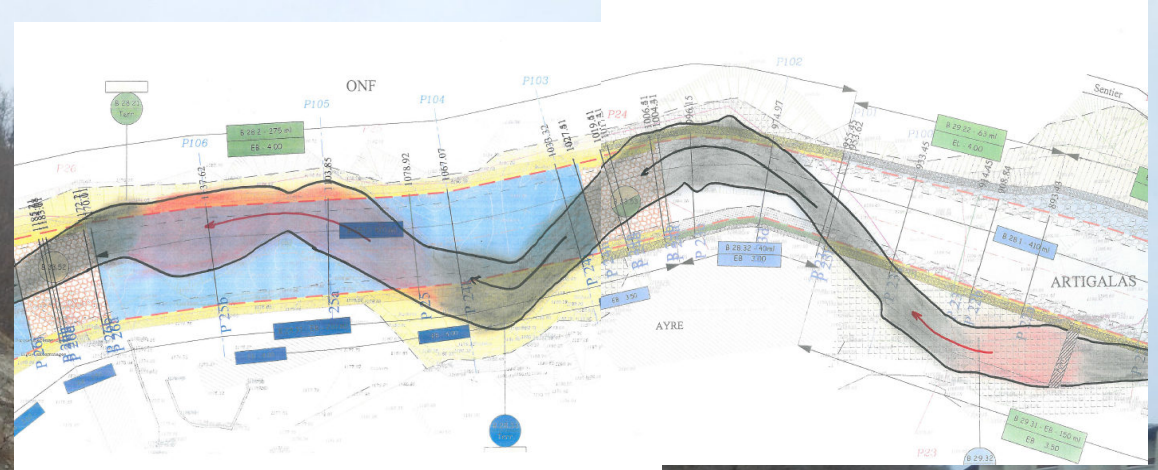
partie en élévation:

- 4 - pose de la première rangée de blocs (blocs les plus gros si possible avec faces planes coté rivière)
- 5- Bétonnage du premier rang d'enrochements
- 6- Remblaiement en arrière avec couche drainante
- 7- Pose des barbacanes
- 8- pose du deuxième rang



25.02.2014 11:18

Chantier SIVOM pays Toy MOe RTM : Barèges /Sers

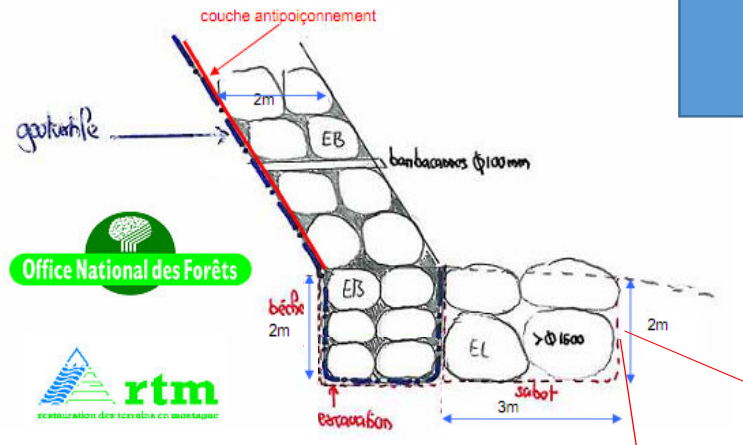


Chantier SIVOM pays Toy MOe RTM : Barèges /Sers : Rive Droite Bastan / FD du Capet Enrochement bétonnés: L=300ml H 4,00m



01.04.2014 12:55

sabot pare fouille amovible constitué de blocs libres
D= 800mm à 1500mm



Office National des Forêts

rtm
restauration des terrains en montagne



Chantier SIVOM pays Toy MOe RTM : Barèges /Sers

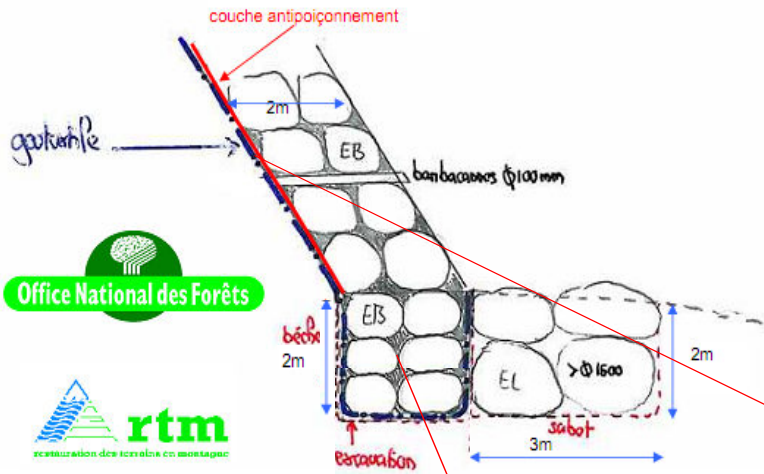


Chantier SIVOM pays Toy MOe RTM : SASSIS

17.01.2014 08:42

Office National des Forêts

rtm
restauration des terrains en montagne



Office National des Forêts

rtm
restauration des terraces en montagne

Géotextile
+
couche de transition 20/40

La bèche en béton ou en béton cyclopéen
en blocs du site lavés
(béton CEM 30/37 XF3)

12.02.2014 16:53

Chantier SIVOM pays Toy MOe RTM : Barèges /Sers Rive droite Bastan / protection en enrochement bétonné des therme de Barzun



17.09.2013 13:51

Secteur du Bois Marie détruit par la crue du 18 juin 2013



Argelès-Gazost, mercredi 23 avril 2014



*Chantier SIVOM pays Toy MOe RTM : Barèges /Sers :Ouvrage de protection en enrochement bétonné, rive droite secteur du Bois marie
EB H=4,0m L=230ml*

SASSIS : effondrement de la berge en rive gauche du Gave de Gavarnie





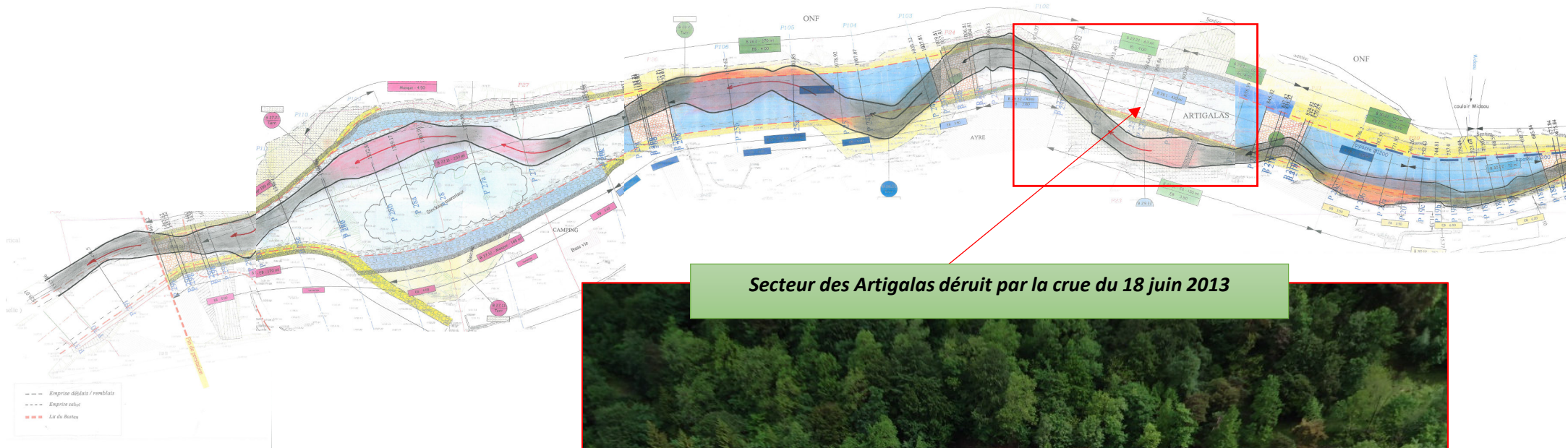
Chantier SIVOM pays Toy MOe RTM : SASSIS
EB H=3m L=610ml



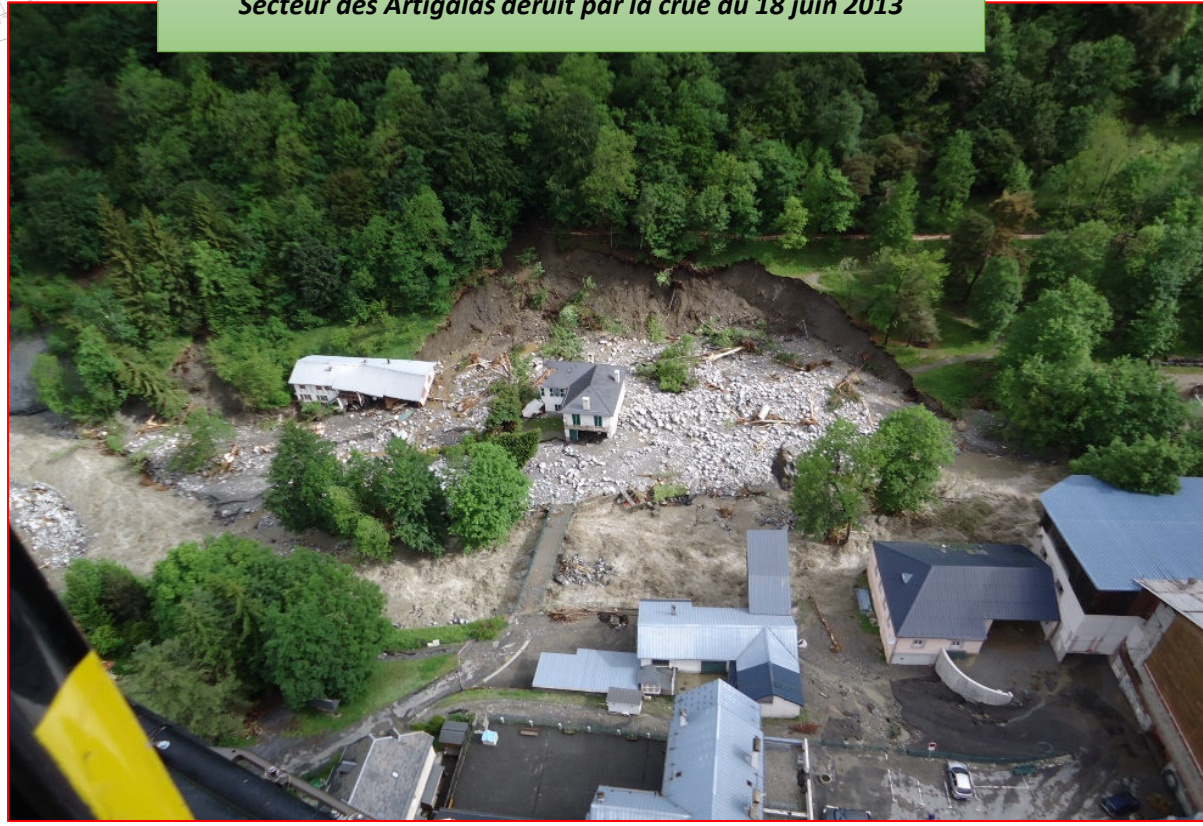
17.01.2014 08:55



**Chantier SYMIHL : MOe RTM : CAUTERETS GARE DES OEUFS
EB H=5,0m à 6,5m L=200ml**



Secteur des Artigalàs détruit par la crue du 18 juin 2013



PROJET RTM : Barèges /Sers OPTIMISATION DE LA SECTION HYDRAULIQUE (secteur des Artigalas)



08.04.2014 14:26

Ouverture significative du Gabarit hydraulique

13.03.2014 17:14



Chantier SYMIHL : MOe RTM : PIERREFITTE SOULOM

13.03.2014 17:47





26.03.2014 12:31

Difficultés d'approvisionnement des blocs sur les chantiers

Des difficultés ont été rencontrées à l'automne et hiver 2013 concernant l'approvisionnement des chantiers d'enrochements en blocs de carrière respectant les exigences du CCTP RTM.

Ces difficultés avaient été en partie appréhendées pour des chantiers nécessitant de mettre en sécurité des enjeux forts, dans un délai court (avant les crues automnales), et sur des linéaires et hauteurs d'ouvrage importantes .

ex: Méthode buse (concepteur GTS GUINTOLI)



encours de construction...



**Chantier SIVOM : MOe RTM : SALIGOS Rive droite Gave de Gavarnie
mur poids béton H=4,5m L=150 ml**

...ouvrage terminé



Difficultés d'approvisionnement des blocs sur les chantiers

Réutilisation de blocs de rivière pour réalisation d'ouvrages maçonnés
ex: chantier de la place du 8 mai à Luz (réalisation LBTP)



13.12.2013 11:47

Chantier SIVOM : MOe RTM : LUZ ST SAUVEUR Rive gauche Bastan
Mur maçonné H=2,5m L=300 ml

Merci de votre attention