

Baccalauréat STI2D

SCIENCES ET

TECHNOLOGIE DE

L'**I**NDUSTRIE



ET DU

DÉVELOPPEMENT

DURABLE

Activité pluridisciplinaire : 1° STI 2D

Enseignements Technologiques Communs

Mathématiques

Sciences Physiques & Chimiques

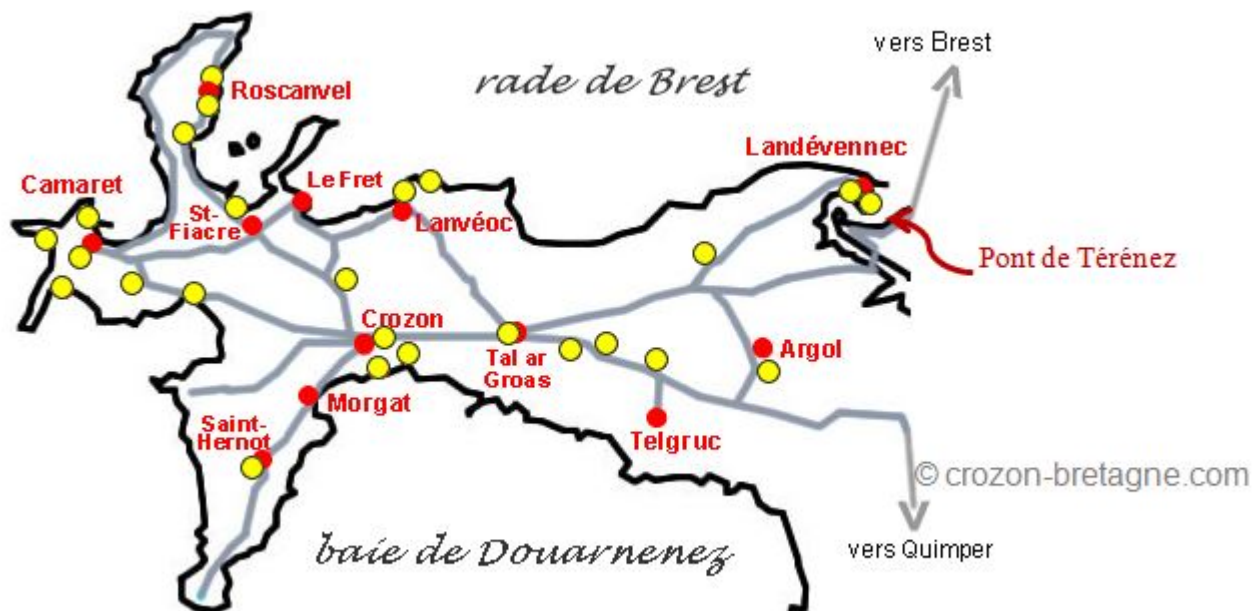
Pont de Térénez



Département du
Finistère 29

Introduction

Le Pont de Térénez enjambe le fleuve Aulne près de son embouchure, aux abords de la rade de Brest (Finistère). Il est l'un des deux principaux points d'accès routiers à la presqu'île de Crozon.



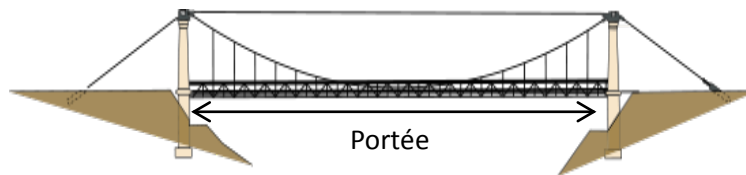
Non loin de ce pont, malade du temps, a été édifié un nouveau pont, inauguré en 2011, premier pont courbe à haubans de France.

Dans cette étude, nous nous proposons d'étudier différents aspects liés à la réalisation de ce pont (aménagement du territoire, raccordement routier ...) et en particulier de répondre à la question suivante :

Pourquoi un pont courbe ?

Historique du Pont de Térénez

Détruit pendant la seconde guerre mondiale, puis reconstruit et achevé en 1951, l'ancien pont de Térénez est un pont suspendu de 350 mètres de long dont 272 mètres pour la portée principale.



Or les pylônes de ce pont sont, depuis longtemps, atteints d'une « maladie » incurable du béton appelée alcali-réaction ou encore « cancer du béton ».

Un traitement pérenne du phénomène s'avérant impossible, le Conseil général du Finistère opta pour la construction d'un nouveau pont à proximité de l'ancien.

Ce dernier devrait être détruit ultérieurement.



L'option majeure de cet ouvrage est d'offrir des accès en courbe pour fluidifier la circulation. Sur le pont de 1951, les accès à angle droit ne permettaient pas le croisement d'un semi-remorque et d'un autre véhicule, l'un devant céder le passage à l'autre.



Angles droits situés de part et d'autre sur les deux berges du pont suspendu provoquant des ralentissements de la circulation.

Le chantier a débuté le 19 avril 2007. L'inauguration a eu lieu le 16 avril 2011.

Le pont de Térénez est le premier pont courbe à haubans de France avec 515 m de portée dont 285 m pour la travée centrale.

L'ouvrage a été conçu par l'architecte Charles Lavigne et l'ingénieur Michel Virlogeux. C'est une première mondiale, car jamais un pont à haubans de forme circulaire n'avait été construit.

Les pylônes font 99 m de haut (environ 30 m de plus que ceux de l'ancien pont).

D'autres chiffres illustrent l'ampleur de la réalisation :

- 72 paires de haubans, 12 500 mètres cubes de béton, 27 500 m² de surface coffrée, 2 300 tonnes d'acier...



Répondre aux questions suivantes sur copie et compléter le document réponse.

Aménagement du territoire

PARTIE A - Vérification de l'intégration du pont dans l'infrastructure routière et dans l'environnement

a.1- Présenter, en 10 lignes maximum, le nouveau pont de Térénez.

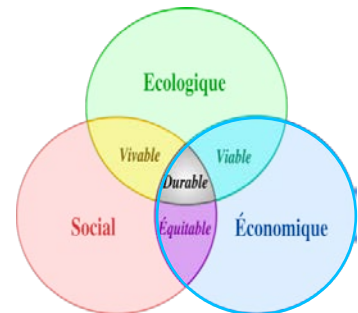
Cette présentation intégrera :

- la situation géographique de l'ouvrage ;
- les noms des personnes à l'origine de ce projet ;
- la principale raison de l'abandon de l'ancien pont suspendu ;
- le coût et le nombre d'années pour le réaliser ;
- le nom de l'entreprise qui s'est occupé de la construction de ce pont ;
- le nombre de personnes qui ont travaillé en même temps sur ce site ;
- l'un des problèmes rencontrés lors de la construction de cet édifice ;
- les moments forts du chantier ;
-

Remarque : vous pourrez vous aider du répertoire "**Dossier Lettres Conseil Régional**", ou de sites internet appropriés.

a.2- Les trois piliers du Développement Durable ont-ils été pris en compte pour ce projet ? Les arguments sont à détailler (4 lignes maxi).

a.3- Quelle zone du schéma ci-contre est concernée pour ce projet (vivable, équitable, durable ...) ?



a.4- Donnez une définition de '**l'aménagement du territoire**'.

Aidez-vous du répertoire "**dossier Ressources**" et du fichier "**Pourquoi un aménagement du territoire**".

a.5- Quel est l'intérêt du pont de Térénez pour cette région ?

aidez-vous des cartes à disposition situées dans le répertoire "**Dossier Cartes**".

a.6- La population locale a-t-elle été concertée sur le futur projet ?

Si oui dans quel numéro d'étape l'indique-t-on ?

Aidez-vous du répertoire "**dossier Ressources**" et du fichier "**10 étapes pour une route**".

a.7- Quels sont les aménagements supplémentaires sur ce pont de Térénez pour le confort des utilisateurs ?

PARTIE B - Un pont courbe, pourquoi ?...



Figure 1

Équipé d'un enregistreur de vitesses instantanées, un véhicule a emprunté, successivement, les deux itinéraires passant par chacun des deux ponts pour se rendre de A en B (voir figure 1 ci-dessus).

Les deux enregistrements ont été consignés sur le même « document réponse » joint en annexe (page 15).

On suppose que les deux itinéraires sont sans dénivelé et que les frottements du véhicule dans l'air et sur la route sont constants mais non négligeables.

b.1- Trouver, à partir de la carte de la figure 1, deux arguments permettant d'affecter à chaque pont un relevé de vitesse.

b.2- Trajet [A ; B] par le nouveau pont

b.21- Quelle est la durée du trajet ?

b.22- Que se passerait-il si le conducteur du véhicule relâchait la pression sur la pédale d'accélérateur (l'explication empruntera les termes scientifiques : « mouvement uniformément décéléré », « énergie cinétique », « frottements », « transformation », « chaleur ») ?

b.23- En déduire pourquoi le conducteur doit maintenir une pression constante sur la pédale d'accélérateur s'il souhaite conserver une vitesse constante. La justification empruntera les termes scientifiques : « énergie mécanique du moteur », « énergie perdue par frottements », « énergie cinétique constante ».

b.3- Trajet [A ; B] par l'ancien pont

b.31- Sachant que la durée du trajet est, maintenant de 55 secondes et que la longueur de ce trajet est estimée à 760 mètres, en déduire la vitesse moyenne du véhicule. Le résultat sera exprimé en m.s^{-1} , puis converti en km.h^{-1} .

b.32- Indiquer sur le document réponse (en annexe), les phases d'accélération et celles de freinage.

b.33- Où le véhicule puise-t-il l'énergie nécessaire lors des phases d'accélération ? Comment cela se traduit-il concrètement pour le conducteur du véhicule ?

b.34- Comment est convertie l'énergie cinétique du véhicule lors des phases de freinage ?

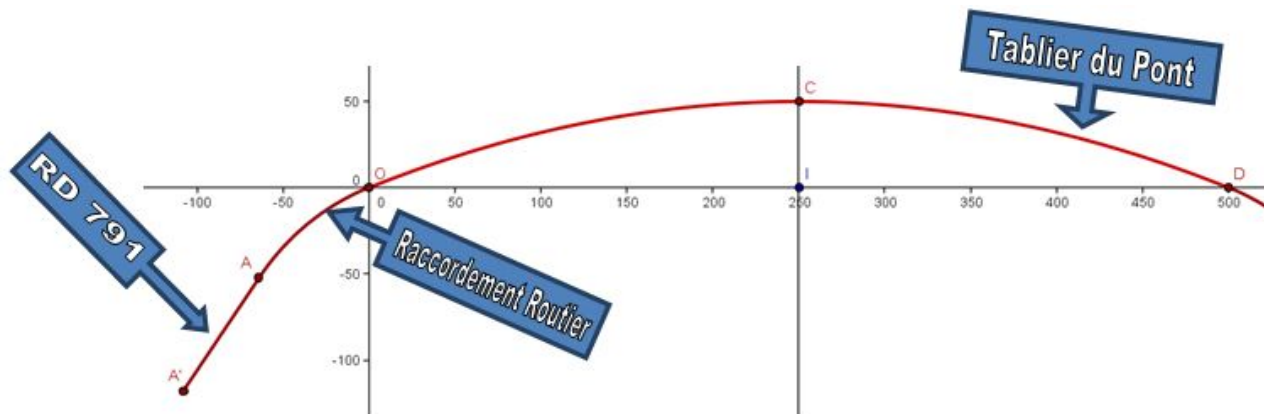
b.4- En vous inspirant des questions des parties b.2 et b.3, trouver deux arguments illustrant le fait que l'ancien pont est plus « énergivore » (et donc plus polluant) que le nouveau.

b.5- Le pont de Térénez intégré dans le système routier local peut-il se nommer "**route durable**" ?

b.6- Dans quelle étape du fichier "**10 étapes pour une route**" situé dans le "**Dossier Ressources**" le choix d'un pont courbe a été défini. Quel est l'intérêt de cette forme ?

PARTIE C - Études du raccordement routier côté Est et du dévers à y appliquer

Le but de cette partie est d'étudier le raccordement du pont de Térénez, côté Est, avec la route départementale 791 en provenance de la commune de Le Faou. On convient de schématiser le problème en ne considérant que l'axe médian de la route.



Sur le schéma précédent :

- l'aboutissement de la RD 791 est symbolisé par le segment $[A'A]$;
- le raccordement entre la RD 791 et le tablier du pont sont symbolisés par l'arc de cercle \widehat{AO} ;
- le tablier du pont est symbolisé par l'arc de courbe \widehat{OD} , symétrique par rapport à la droite (IC), médiatrice du segment $[OD]$ (I, milieu de $[OD]$ et C appartenant à l'arc de courbe \widehat{OD}).

On définit pour ce schéma un repère orthonormal $(O; \vec{i}, \vec{j})$ direct du plan tel que $\overrightarrow{OD} = 500 \vec{i}$ (la distance réelle entre O et D étant ici supposée de 500 mètres).

Dans ce repère, on considère alors que :

- le point A a pour coordonnées $(-108; -118)$ et le point C a pour coordonnées $(250; 50)$;
- la demi-droite $[A'A)$ a pour coefficient directeur $\frac{3}{2}$ (l'angle aigu mesuré entre cette droite et l'axe des ordonnées étant d'environ $33,69^\circ$), la position du point A n'étant pas encore définie.

c.1- Étude du tablier du pont

La forme de l'arc de courbe \widehat{OD} correspondant au tablier du pont, suggère qu'il peut s'agir de la représentation graphique d'une fonction f trinôme du second degré, définie sur l'intervalle $[0 ; 500]$.



www.cc-aulne-maritime.fr

- c.11- Déterminer une expression de la fonction f , et en déduire le coefficient directeur de la tangente à l'arc de courbe \widehat{OD} au point O.

c.2- Étude du raccordement entre la RD 791 et le tablier du pont

Le raccordement (partie médiane de la route) entre la RD 791 et le tablier du pont, côté Est, se présente sous la forme d'un arc de cercle \widehat{AO} . Le but de cette partie est de déterminer le centre, le rayon et la longueur de cet arc de cercle.

- c.12- Représenter, sur un logiciel de géométrie dynamique (type Geogebra), la situation donnée (demi-droite $[A'A)$, courbe $y = f(x)$, tangentes requises, ...) et déterminer avec une précision suffisante la position du point A qui répond à la question.
Donner alors les éléments demandés concernant l'arc de cercle \widehat{AO} .

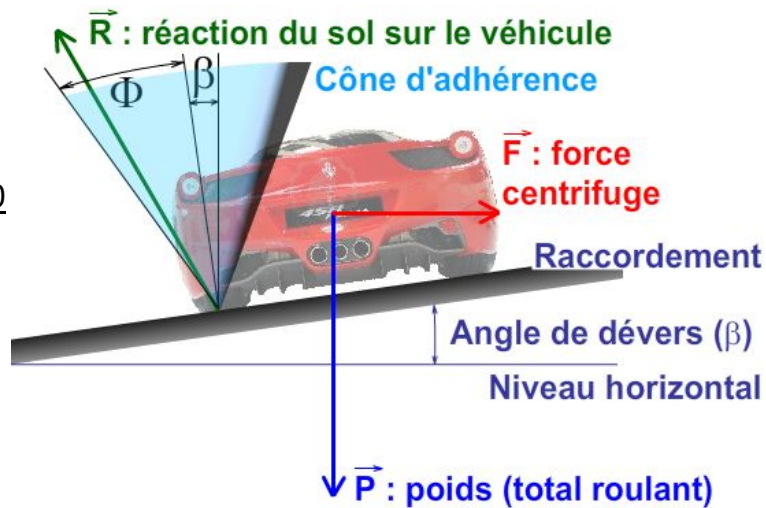


© breizboheme.canalblog.com

c.3- Vitesse de franchissement du raccordement et détermination du dévers

On sait que la courbure de la route est maximale sur le raccordement \widehat{AO} . On cherche à estimer la vitesse maximale que doit avoir un véhicule abordant, depuis la RD 791, ce raccordement, dans différentes conditions.

Voir animation du phénomène page 10



La force centrifuge limite exercée sur un véhicule est donnée par :

$$F_{\text{lim}} = m \cdot g \cdot \tan(\beta + \phi), \text{ où :}$$

- m est la masse du véhicule ;
- g est la force de gravité, égale à $9,81 \text{ m.s}^{-2}$;
- β est l'angle, en degrés, du dévers dans le virage ;
- ϕ est le demi-angle, en degrés, au sommet du cône d'adhérence (cône limite lié à l'action des forces de frottement sur le véhicule), à savoir :
16,7° sur sol mouillé et 33,0° sur sol sec.


La force qui tend à tirer un véhicule vers l'extérieur du virage est donnée par :

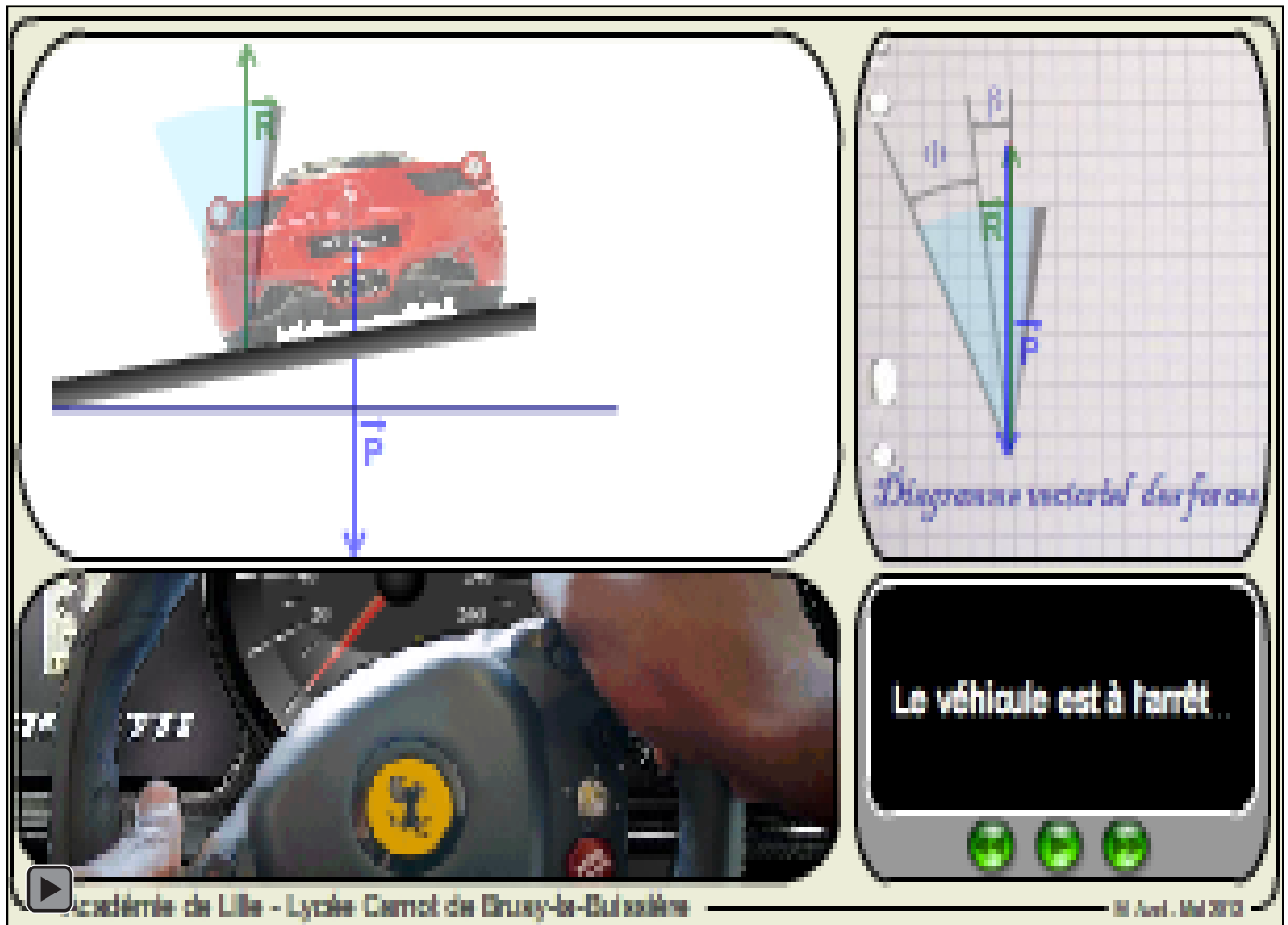
$$F = \frac{m \cdot V^2}{R}, \text{ où :}$$

- V est la vitesse, supposée constante, du véhicule dans le virage ;
- R est le rayon de l'arc de cercle correspondant au raccordement.

Pour qu'un véhicule ne soit pas tiré vers l'extérieur du virage, on doit avoir $F < F_{\text{lim}}$.

- c.31 - En l'absence de dévers, déterminer la vitesse maximale (à 10 km.h⁻¹ près) que doit avoir un véhicule s'il ne veut pas être tiré vers l'extérieur du virage, d'une part sur sol sec, d'autre part sur sol mouillé. Conclure à la place de la Direction Départementale de l'Équipement (DDE).
- c.32 - Déterminer le dévers minimal à appliquer sur le raccordement \widehat{AO} pour que la DDE puisse laisser la vitesse maximale à 80 km.h⁻¹ lors de l'accès au pont, sur sol mouillé.

L'animation ci-dessous explique plus en détails cette notion de cône d'adhérence. Pour l'activer, il suffit de cliquer une première fois dessus, puis de lancer la lecture à l'aide du bouton 



The animation interface consists of four main panels:

- Top Left:** A 3D rendering of a red sports car on a banked curve. A green vector \vec{R} (centrifugal force) points upwards along the vertical axis, and a blue vector \vec{P} (weight) points downwards. A light blue cone of adhesion is shown behind the car.
- Top Right:** A 2D vector diagram on a grid background. It shows a blue vector \vec{P} pointing downwards, a green vector \vec{R} pointing upwards, and a blue vector \vec{F} pointing along the vertical axis. The angle between \vec{P} and \vec{F} is labeled β . The text "Diagramme vectoriel des forces" is written in blue cursive.
- Bottom Left:** A close-up image of a steering wheel with a yellow Ferrari logo. A play button icon is in the bottom left corner.
- Bottom Right:** A black rectangular box with the white text "Le véhicule est à l'arrêt...". Below the box are three green circular buttons.

At the bottom of the animation frame, there is a footer: "Académie de Lille - Lycée Carnot de Bruay-la-Buissière" on the left and "14 Avril - Mai 2013" on the right.

Structure Porteuse du Pont

PARTIE D - Pourquoi un pont à HAUBANS ?

Les parties précédentes du sujet ont démontré l'utilité du pont courbe. Plusieurs choix de pont courbe avec différents types de maintien du tablier étaient réalisables. Un nouveau pont de type suspendu (comme l'ancien) mais courbé aurait posé des problèmes de réalisation pour les deux câbles principaux reliant les câbles verticaux au tablier du pont.



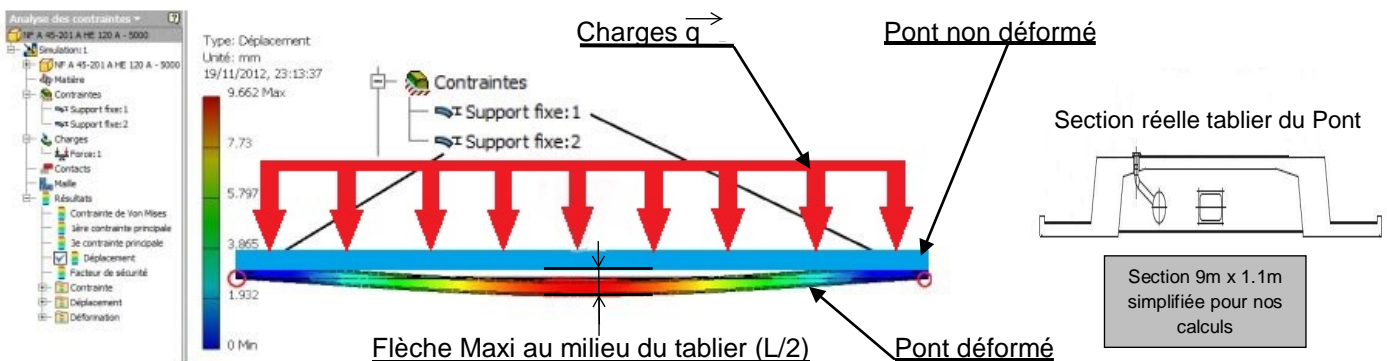
En effet ces câbles principaux doivent rester rectilignes pour maintenir correctement les câbles verticaux au tablier. Une autre solution était de placer des piles (piliers) sous le tablier ceux-ci auraient eu leur fondation dans le sol du fleuve. Après des sondages de ce sol, les résultats ont montré trop d'instabilité pour valider cette solution.

Le choix du pont à Haubans s'est révélé comme l'un des meilleurs du point de vue réalisation technique et intégration dans le paysage.

Pour la suite de l'étude, aidez-vous du "dossier Les Ponts" et des formules données.

d.1- Vérification de la déformation théorique du tablier à vide (sans véhicule routier)

- d.11- A quel phénomène principal de déformation est soumis ce pont ?
- d.12- Les changements climatiques influencent-ils certains paramètres du tablier ?
Si oui, donnez le phénomène principal produit.
- d.13- Calcul de la valeur de la flèche Maxi pour le tablier du pont de Térénez.



- d.131- Calculer le poids total $\|\vec{P}\|$ de toute la longueur du tablier, puis la charge $\|\vec{q}\|$ en N/m (poids en N sur 1 m de longueur).

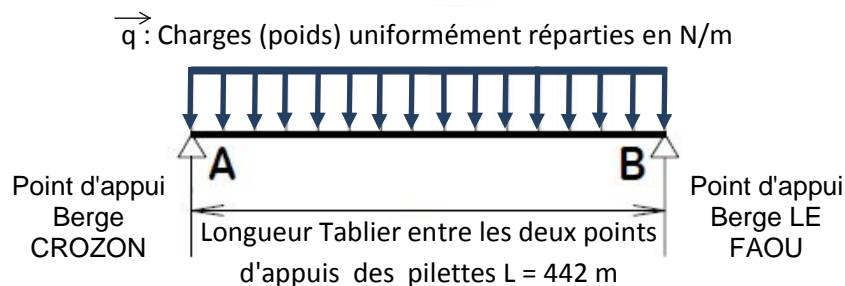
Rappels :

m (masse en kg) = ρ (masse volumique en kg/m³) x V (volume en m³)

P (poids en Newton N) = m (masse en kg) x g (accélération de la pesanteur en m/s²) avec $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

Données : ρ béton armé = 2500 kg/m³ (matière principale du tablier)
Section moyenne simplifiée tablier $S = 9 \text{ m} \times 1.1 \text{ m}$ sur
une longueur totale de $L = 515 \text{ m}$

- d.132- Calculer la flèche f du tablier du pont de Térénez.
Nous prendrons en compte pour nos calculs uniquement le poids propre du tablier.
Le schéma simplifié et la relation de f ci-dessous représentent les éléments utiles pour notre résolution.



Voir répertoire '[Documents techniques du Pont](#)',
[fiche technique 3 Le Tablier](#) et [fiche technique 4 Les Haubans](#)

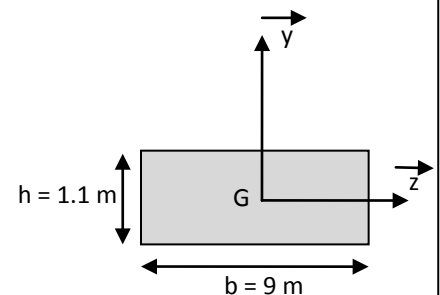
Relation de la flèche pour une poutre sur deux appuis avec charges réparties

La relation de la flèche est $f = \frac{5 \times q \times L^4}{384 \times E \times IG_z}$

E : module d'élasticité du matériau (module de young en N/m²)

$IG_z = \frac{b \times h^3}{12}$ avec $b = 9 \text{ m}$ et $h = 1.1 \text{ m}$ (formule Moment

quadratique pour les sections rectangulaires ou carrées).



Section Tablier

Donnée : $E = 37272.10^6 \text{ N/m}^2$ (béton armé).

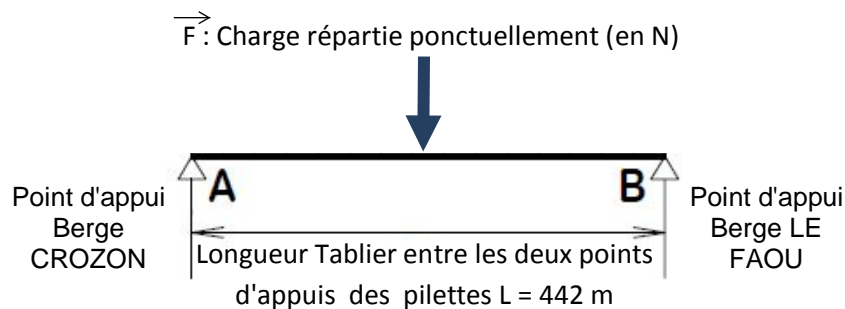
- d.133- Que peut-on en déduire de cette valeur de flèche et celle-ci est-elle acceptable ?
- d.134- Les haubans sont-ils utiles pour le maintien horizontal du tablier et combien y en a-t-il ?
- d.135- Que vont-ils subir comme sollicitation(s) mécanique(s) ? (Flexion, Traction ...)
- d.136- Déterminer l'intensité globale $\vec{F_g}$ en N (sur les 442 m du tablier) de l'action mécanique que vont recevoir les haubans pour avoir la valeur de $f = 0 \text{ m}$ (remplacer dans la relation de la question d.132, f par 0 m, \vec{q} (à déterminer) et les autres termes restent inchangés).

d.2- Vérification de la déformation théorique du tablier avec charges (véhicules routiers)

Voir répertoire '[Documents techniques du Pont](#)',
fiche technique 3 Le Tablier et fiche technique 4 Les Haubans

Huit camions de chantier, soit **256 tonnes**, ont été postés sur le pont de Térénez en son milieu. La flèche obtenue est d'environ **14 cm**.

- d.21- Calculer la flèche théorique **f** du tablier avec charges du pont de Térénez.
Nous prendrons en compte pour nos calculs uniquement le poids total des véhicules.
Le schéma simplifié et la relation de **f** ci-dessous représentent les éléments utiles pour notre résolution.



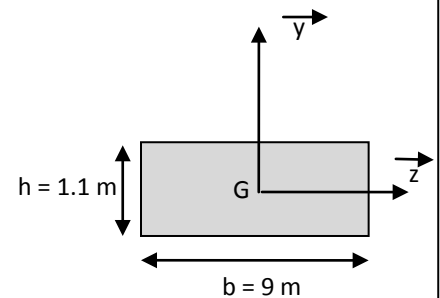
Relation de la flèche pour une poutre sur deux appuis avec charge Ponctuelle

La relation de la flèche est $f = \frac{F \times L^3}{48 \times E \times IG_z}$

E : module d'élasticité du matériau (module de young en N/m^2)

$$IG_z = \frac{b \times h^3}{12} \quad \text{avec } b = 9 \text{ m et } h = 1.1 \text{ m}$$

Donnée : $E = 37272.10^6 \text{ N/m}^2$ (béton armé).



- d.22- Cette valeur de flèche est - elle cohérente pour la sécurité du pont ?
Déterminer alors l'intensité globale $\vec{F_c}$ en N de l'action mécanique que vont recevoir les 72 paires de haubans pour avoir la valeur de flèche **f = 14 cm**. (Remplacer dans la relation de la question d.21, **f** par 0.14 m, \vec{F} par $\vec{F_c}$ (à déterminer) et les autres termes restent inchangés)

d.3- Vérification de la déformation théorique (allongement) des haubans avec charges

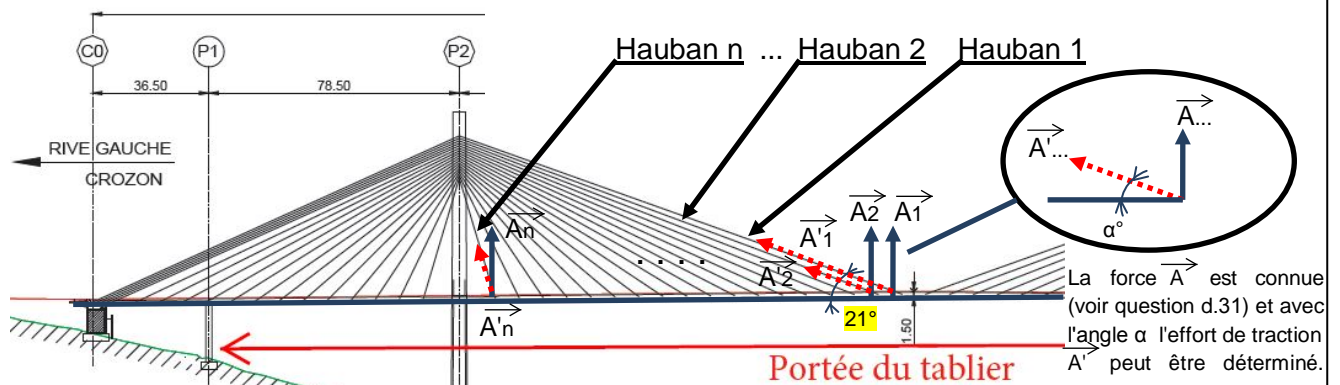
Pour garder une flèche égale à 14 cm, les 72 paires de haubans doivent supporter les intensités des actions mécaniques $\vec{F_g}$ et $\vec{F_c}$ cumulées avec $\vec{F_{totale}} = \vec{F_g} + \vec{F_c}$.

- d.31- Calculer l'intensité de l'action mécanique $\|\vec{A_1}\|$ ou $\|\vec{A_2}\|$ ou $\|\vec{A_{144}}\|$ (représenté schéma partiel page 13) que va récupérer chaque hauban avec la charge $\vec{F_{totale}}$.
On sait que $\vec{F_{totale}} = \vec{A_1} + \vec{A_2} + \vec{A_3} + \dots + \vec{A_{144}}$.

d.32- Sur la figure ci-dessous lequel des haubans sera le plus soumis à la déformation d'allongement ?

Remarque : Plus l'angle entre le hauban et le tablier sera petit et plus le hauban sera soumis à la sollicitation de TRACTION (α compris entre 21° mini et $< 90^\circ$ maxi).

Schéma partiel du pont de Térénez



d.33- Calculer le module (en N) du $\|\vec{A}' \dots\|$ correspondant au numéro de hauban choisi à la question d.32

Les haubans les plus soumis aux sollicitations mécaniques sont constitués de 27 torons et chaque toron comporte 7 filins en acier de diamètre 4 mm (voir figure ci-contre).



Hauban

Toron

d.34- Malgré les résultats précédents, on considère le hauban 1 avec \vec{A}'_1 soumis le plus à la sollicitation de TRACTION. Calculer alors l'allongement ΔL (en mm) de celui-ci et vérifier que la valeur reste acceptable pour la sécurité des utilisateurs (< 1 mm).

Rappels :

$$\sigma_{Maxi} = \frac{N}{S} \leq Rpe = \frac{Re}{s}$$

avec $\Delta L = \frac{L \times \sigma_{Maxi}}{E}$

σ_{Maxi} : Contrainte de traction dans le hauban (en N/mm^2)
 N : effort Normal (en N) correspondant à l'intensité de \vec{A}'_1
 S : surface des 27 torons (en mm^2)

Données : Module de young pour l'acier $E = 2.0499.10^{11} N/mm^2$ (matière principale haubans)
 Longueur hauban 1, $L = 145m$

ANNEXE

Document réponse

