



Figure 13 : Pont en arc – Pont Sydney Harbour Bridge (Australie)

III. Avantages et inconvénients des variantes proposées

Nous allons procéder à l'analyse multicritère pour déterminer la structure la plus convenable, mais avant, passons par les avantages et inconvénients en général des variantes proposées.

Tableau 22 : Analyse des avantages et inconvénients des variantes proposées

Types de structure	Avantages	Inconvénients
Pont suspendu, sans haubans, avec deux piliers	- Les ponts suspendus peuvent enjamber des distances beaucoup plus grandes que tout autre type de pont.	<ul style="list-style-type: none"> - Il nécessite la présence de massifs d'ancrage, indispensables pour retenir les forces considérables qui s'exercent ; - L'entretien, comme le remplacement des câbles devient un travail très dur et fastidieux, demandant plusieurs mois ainsi que la fermeture du pont durant ce délai. - Les ponts suspendus sont très souples, et l'oscillation pourrait être amplifiée par le vent, causant la désintégration du pont.

Types de structure	Avantages	Inconvénients
Pont à haubans avec deux piliers	<ul style="list-style-type: none"> - Enjamber des distances beaucoup plus grandes que tout autre type de pont. - Par rapport au pont suspendu, on économise sur l'énorme câble qui supporte l'ensemble du poids de l'ouvrage. C'est donc moins cher à construire. - La répartition des forces au niveau des piliers rend inutile la réalisation de massifs d'ancrage dans les berges ; - Permet une variété architecturale. - Seul système utilisable sur mauvais sols. - Il peut être monté facilement - Grande facilité d'entretien. En cas de besoin, on peut remplacer l'un des câbles d'un pont haubané sans trop de difficultés 	<ul style="list-style-type: none"> - Les haubans doivent être élevés, et sont par conséquent, plus fragiles et plus vulnérables au vent et aux vibrations engendrées par la circulation. - Les ponts à haubans sont plus limités en portée que les ponts suspendus : le hauban qui suspend le tablier le plus éloigné de la pile est très incliné et travaille sous une grande traction.
Pont en arc métallique	<ul style="list-style-type: none"> - Le pont en arc peut être très long ; - On évite le problème d'affouillement car le pont est dépourvu de pile ; - Il possède un tirant d'air important qui permet la navigation ; - L'utilisation de l'acier pour la structure le rend plus léger. 	<ul style="list-style-type: none"> - L'obligation d'avoir des appuis à droite et à gauche solides pour s'opposer aux forces qu'exercent le pont.

IV. Analyse multicritère et choix de la variante à retenir

Afin de faire le choix de la solution la plus convenable, il faut connaître l'ensemble des contraintes d'ordre naturel et fonctionnel à respecter. C'est une opération de synthèse dans laquelle interviennent de nombreux paramètres. L'analyse se base sur la comparaison des propositions suivant les sept (7) critères ci-après :

1^{er} critère : Condition d'exploitation

Il s'agit des qualités de l'ouvrage : la résistance de l'ouvrage, sa capacité de répondre aux exigences des usagers.

2^{ème} critère : Devis quantitatifs des matériaux de construction

Pour évaluer une variante, on a besoin de connaître la quantité de matériaux nécessaires pour sa réalisation.

3^{ème} critère : Technologie de construction

Elle traduit la nécessité d'installation d'engins spéciaux et de l'exigence en main d'œuvre pour la construction.

4^{ème} critère : Délai d'exécution

C'est le temps nécessaire pour la réalisation des travaux.

5^{ème} critère : Esthétique de l'ouvrage

On doit se soucier non seulement sur la résistance mais aussi sur la beauté de l'ouvrage. L'architecture du pont est un critère primordial pour ce projet :

- Ne pas fermer l'espace, l'ouvrage doit être aussi transparent que possible et éviter de constituer un obstacle visuel
- Bonne ordonnance de la structure, privilégier la continuité des lignes et limiter le nombre de directions dans l'espace
- Intégration dans l'environnement, un grand pont peut devenir un élément majeur du site, éclairage et mise en valeur de l'intention structurale, effet de la lumière et des ombres
- Aspect des parements, texture et couleur des matériaux, ornement des corniches et garde-corps.

6^{ème} critère : Dépense pour l'entretien et l'exploitation

Elle dépend de plusieurs facteurs comme : la tenue de l'ouvrage face aux agents extérieurs, ses caractéristiques, la résistance à la fatigue des éléments.

7^{ème} critère : Coût de la construction

Le coût des travaux est un des critères les plus importants dans un projet.

Tableau 23 : Evaluation des variantes

Critères	Variante n° 1 : Pont suspendu	Variante n°2 : Pont à haubans	Variante n° 3 : Pont en arc
Condition d'exploitation	La caractéristique du vent de la région risque de déstabiliser l'ouvrage	Très bonne résistance	Les caractéristiques des matériaux de construction assure la résistance du sol
Devis quantitatifs des matériaux de construction	Nécessite une grande quantité de béton pour les piliers et l'ancrage des câbles, une grande quantité d'acier et de câble	Nécessite une grande quantité de béton pour les mâts et de grande quantité de câbles pour les haubans	Nécessite une grande quantité d'acier pour l'arc
Technologie de construction	La réalisation nécessite un grand nombre de main d'œuvre et des engins spéciaux	La réalisation de l'ouvrage nécessite une grande qualification des ouvriers	La réalisation ne nécessite aucune disposition particulière vu que la construction est en acier.
Délai d'exécution	Assez long, les contraintes du climat local peut influencer sur le délai d'exécution	Durée moyenne	Courte durée
Esthétique de l'ouvrage	Ouvrage sophistiqué et moderne	Ouvrage sophistiqué et moderne	Ouvrage sophistiqué et moderne
Entretien et exploitation	Le remplacement des câbles est difficile à réaliser	Le remplacement des câbles est plus facile à réaliser	Le remplacement des câbles ne cause aucun problème

Pour la comparaison, on affecte à chaque critère une note variant de 1 à 3 afin de quantifier les contraintes de chaque variante :

Note 1 : moins avantageux

Note 2 : moyennement avantageux

Note 3 : très avantageux

Tableau 24 Analyse multicritère

Critères	Variante n° 1 : Pont suspendu	Variante n°2 : Pont à haubans	Variante n° 3 : Pont en arc
Condition d'exploitation	1	3	3
Devis quantitatifs des matériaux de construction	2	2	2
Technologie de construction	2	2	3
Délai d'exécution	2	3	3
Esthétique de l'ouvrage	3	3	3
Entretien et exploitation	1	2	2
Coût des travaux	2	2	2
Note totale	13	17	18

Après avoir effectué l'analyse multicritère des trois variantes proposées, on va considérer le pont en arc dans l'étude.

V. Justification du choix retenu

Même si le pont en arc l'emporte sur le pont haubané et le pont suspendu, il reste encore à discuter si sa réalisation pourrait intéresser les bailleurs. Il ne suffit pas de faire un bon projet pour qu'il soit construit. Il faut encore savoir convaincre les décideurs, qu'il s'agisse d'autorités administratives ou d'élus locaux.

Certains maîtres d'ouvrage ou certains organismes devant intervenir dans les choix, préfèrent des ouvrages discrets qui tentent de disparaître dans le paysage.

Cet objectif de « discrétion » condamne plusieurs projets auxquels les concepteurs tenaient beaucoup. Il est alors dans notre devoir de réfléchir aux raisons de ces échecs et trouver les moyens

de convaincre les décideurs du bien fondé et de la qualité de nos projets, de l'intérêt de structures fortes et vigoureuses.

Alors, pourquoi construire un pont en arc et pourquoi en acier ?

Aujourd'hui, l'acier est le matériau incontournable pour les ouvrages d'art de moyenne et grande portée. Les ponts trouvent dans l'acier la possibilité de repousser toujours plus loin leurs limites structurelles, d'allier performance, technique et réussite esthétique.

Jusqu'à la fin des années 60, l'acier était à l'honneur dans les ponts. Il a ensuite essuyé de plein fouet par le développement du béton précontraint, dans les années 70, disparaissant pratiquement du marché des ponts. Enfin, depuis les années 80, après une grande évolution de sa résistance à la corrosion, il a amorcé un retour en force, qui n'a cessé depuis de se confirmer.

Ce sont les ponts en arc qui, ces dernières années, ont redonné à l'acier ses lettres de noblesse dans le secteur. Car il a restitué au pont son qualificatif d'ouvrage d'art, autrement dit sa dimension esthétique.

De plus, la sidérurgie n'a cessé d'innover dans les aciers, produisant des nuances au ratio résistance/masse toujours plus élevé, d'où un allègement des structures ; des aciers capables de couvrir des portées plus grandes, de supporter des charges plus importantes, de créer des formes inédites ; des aciers soudables sans précautions particulières ou autorisant des assemblages de nuances différentes, des aciers résistant mieux à la corrosion..., etc.

Les efforts de la sidérurgie ont porté également sur le rapport qualité/prix de l'acier, toujours plus compétitif ; sur l'élargissement des gammes dimensionnelles des tôles, sur l'amélioration des tolérances sur épaisseur et la réalisation de tôles à épaisseur variable, et enfin sur le développement des tôles thermomécaniques en fortes épaisseurs et à soudabilité exceptionnelle.

Les études préliminaires nous ont données les paramètres dans l'étude du projet, du type de fondation jusqu'au nombre de voie. Il nous a aussi permis de conclure que l'étude d'un pont en arc se trouve beaucoup plus intéressant. Ainsi donc, dans le chapitre suivant, nous détailler les études techniques concernant cette variante.

PARTIE III : ETUDES TECHNIQUES

CHAPITRE VII : **DONNEES ET HYPOTHESES DE CALCUL**

I. Normes de calcul

Afin d'avoir un ouvrage bien conçu, l'ingénieur doit respecter les règles de l'art pendant sa conception et sa réalisation, il doit suivre les règles de conception et se référer à des normes reconnues par les autorités réglementaires, établies par des ingénieurs expérimentés et spécialistes à la matière. Avant, chaque pays avait sa propre norme, et cela limitait les entreprises et les ingénieurs d'exercer leurs fonctions en dehors de leurs pays. On a pris alors, en 1975, une initiative de créer un Comité Européen de Normalisation (CEN). Ce comité constitué par des ingénieurs expérimentés, de spécialités différentes et venant des différents pays de l'Europe, avait alors comme mission d'établir une seule norme pour le continent, qui est la norme Eurocode. L'application de cette norme devenait impérative pour les pays membre de l'Union Européen.

Pour les ingénieurs Malgaches, travailler avec les anciens normes françaises (BAEL, BPEL, CCTG...) est beaucoup plus pratique. Cependant, l'utilisation de ces normes n'est plus vraiment recommandée. Nous allons, par conséquent, utiliser la norme Eurocode dans ce mémoire.

Pour le calcul des structures, l'Eurocode comprend les programmes suivants :

EN 1990 Eurocode 0 : Bases de calcul des structures ;

EN 1990 Eurocode 1 : Actions sur les structures ;

EN 1990 Eurocode 2 : Calcul des structures en béton ;

EN 1990 Eurocode 3 : Calcul des structures en acier ;

EN 1990 Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier-béton ;

EN 1990 Eurocode 5 : Calcul des structures en bois ;

EN 1990 Eurocode 6 : Calcul des structures en maçonnerie ;

EN 1990 Eurocode 7 : Calcul géotechnique ;

EN 1990 Eurocode 8 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes ;

EN 1990 Eurocode 9 : Calcul des structures en aluminium.

I. 1. Matériaux de construction

On s'assurera que tous les matériaux à utiliser sont de bonne qualité, suivent les normes et respectent les règles qui conditionnent la pérennité de l'ouvrage. Des essais et des contrôles devront toujours se faire à chaque réception de matériaux.

I. 1.1. Acier

L'acier est le principal matériau constitutif de notre pont en arc. Les poutres, le tablier et aussi l'arc sont tous en acier. Le type d'acier qu'on a choisi dans l'exécution de ce projet est l'acier CORTEN qui possède une capacité de résistance à la corrosion très intéressante. C'est un acier de construction, avec les caractéristiques mécaniques assimilables à la qualité S355. Il fait l'objet de la norme NF EN 10025-5 du 5 Mars 2005.

Les caractéristiques chimiques de l'acier Corten sont :

Carbone (C) ≤ 12 %

Silicium (Si) $\leq 0,75$ %

Manganèse (Mn) $\leq 1,00$ %

Phosphore (P) = 0,06 – 0,15

Soufre (S) $\leq 0,035$

Aluminium (Al) $\leq 0,020$

Cuivre (Cu) = 0,25 – 0,55

Chrome (Cr) = 0,30 – 1,25

Nickel (Ni) $\leq 0,65$

Les propriétés mécaniques sont :

- Acier S355 suivant la norme EN 10025-2 :

$$f_{yb} = 355[N/mm^2] \text{ et } f_u = 510[N/mm^2]$$

- Module d'élasticité longitudinale : $E = 210\,000$ [MPa]

- coefficient de Poisson : $\nu = 0,3$

- Module de cisaillement : $G = E / 2(1+\nu) = 81\,000$ [MPa]

- coefficient de dilatation thermique linéaire : $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$ par K (pour $T \leq 100^\circ\text{C}$)

Nous avons les exigences de ductilité suivant :

- $f_u/f_y \geq 1,10$ (f_u est la résistance à la rupture de l'acier et f_y est la limite d'élasticité) ;

- Allongement à la rupture $\geq 15\%$;

- $\varepsilon_u \geq 15 \cdot \varepsilon_y$ (où $\varepsilon_y = 15 \cdot f_y / E$: déformation élastique et ε_u : déformation ultime).

I. 1.2. Béton

On utilise le béton armé surtout pour les éléments de l'infrastructure tels que les culées, les ancrages, la fondation, ...

Avec un contrôle strict, nous utiliserons de béton C25/30 ayant les caractéristiques mécaniques suivantes :

$f_{ck} = 25$ [MPa] : résistance caractéristique en compression du béton mesurée sur cylindre ;

$f_{ck,cube} = 30$ [MPa] : résistance en compression du béton mesurée sur cube ;

$f_{cm} = 33$ [MPa] : résistance moyenne en compression du béton à 28 jours ;

$f_{ctm} = 2,6$ [MPa] : résistance moyenne en traction directe du béton ;

$f_{ctk, 0,05} = 1,8$ [MPa] : résistance caractéristique en traction directe du béton (fractile 5%) ;

$f_{ctk, 0,95} = 3,3$ [MPa] : résistance caractéristique en traction directe du béton (fractile 95%)

$E_{cm} = 31$ [GPa] : Module d'élasticité sécant du béton entre $\sigma_c = 0$ et $0,4.f_{cm}$;

Le coefficient linéaire de dilatation thermique du béton est de $10.10^{-6} K^{-1}$

Classe d'exposition en fonction des conditions d'environnement du béton : XS1 car la structure se trouve à proximité de la côte, elle est exposée à l'air véhiculant du sel marin mais pas en contact direct avec de l'eau de mer.

Masse volumique du béton armé : $2\ 500$ [kg/m³]

I. 1.3. Acier d'armature

Pour les armatures, nous choisissons des barres à hautes adhérences dont les caractéristiques sont :

- Masse volumique : $7\ 850$ kg/m³ ;
- Limite d'élasticité : $f_{yk} = 500$ MPa ;
- Limite supérieure réelle d'élasticité : $f_{y,max} \leq 650$ MPa ;
- Module d'élasticité : $E_s = 210$ GPa.

I. 1.4. Ciment

Nous utiliserons de ciment suivant les normes NFP-15-300 et NFP-15-301.

Catégorie : CEM I

Classe : 42,5

Dosage : 350 kg/m³

I. 2. Logiciel Pybar

PyBar est un logiciel libre de RDM pour le calcul de structures planes de type poutres, basé sur la méthode des déplacements . C'est un projet récent puisqu'il a débuté en mai 2007. Il permet désormais de résoudre la plupart des problèmes de la RDM. PyBar constitue une alternative libre au logiciel RDM6 ou à d'autres solutions de type éléments finis.

II. Aspect général du pont : morphologie

II. 1. Généralité sur les ponts en arc

Un pont en arc est avant tout une poutre courbe portant un tablier, à fibre moyenne de géométrie circulaire ou parabolique et à réactions d'appui obliques. Les ponts en arc sont des ponts utilisant un arc pour ramener les efforts en appui en suivant des lignes de compression pure. Ils sont capables de transformer les charges verticales du tablier en forces obliques qui vont suivre la forme de l'arc. Ces forces vont se transmettre au terrain à travers les culées et vont se décomposer en deux : une force verticale et une force horizontale qui aura tendance à écarter les culées.

II. 2. Choix et justification de la morphologie du pont

Il existe trois types de pont en arc :

- Pont en arc à tablier supérieur (le tablier est placé au-dessus de l'arc) ;
- Pont en arc à tablier inférieur (le tablier est en dessous de l'arc) ;
- Pont en arc à tablier intermédiaire

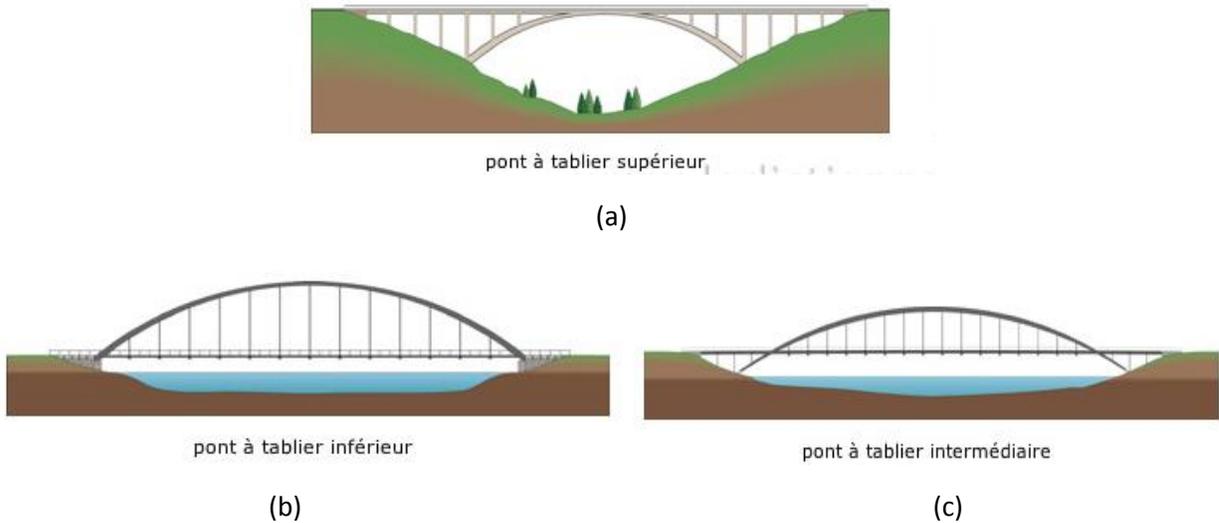


Figure 14 : Les 3 types de pont en arc

Lequel de ces trois types de pont nous conviendrait-il dans ce projet ? On constate que la hauteur de l'obstacle qu'on devrait franchir n'est pas suffisamment importante pour orienter notre choix vers le pont à tablier supérieur, cela ne va entraîner qu'un remblai d'accès trop volumineux et un grand décalage entre le de la route nationale et du pont. Pour éviter à la fois ces problèmes et la submersion des arcs et du tablier (qui sont métalliques), il est plus commode d'opter pour un pont à tablier intermédiaire. Ce pont sera constitué de trois travées indépendantes disposées de la manière suivante : une travée centrale suspendue à des suspentes et deux travées extrêmes dépourvues de suspentes mais s'appuyant sur des potelets.

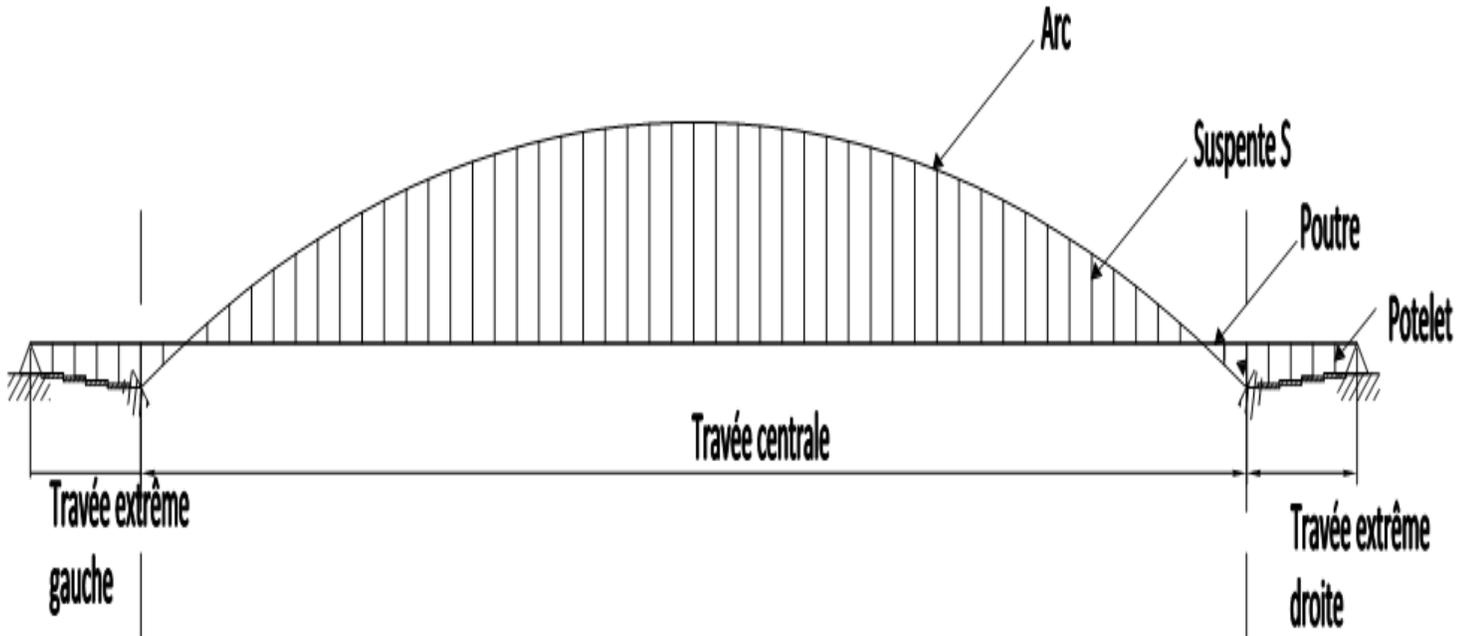


Figure 15 : Modélisation du pont