



# STAGE PFE

## ANNEE 2010-2011

### MODELISATION DISCRETE D'UN SYSTEME PARAVALANCHES MONO-ANCRAGE

**Nom et prénom de l'étudiant :** OLMEDO MANICH, Ignacio

**Filière :**

ASI

GEN

HOE

IEE

ME

PIME

SEM

**PROJET**

Groupe Heaven Climber  
19, Avenue Victor Hugo, Le point de Claix 38800

Cemagref  
2, Rue de la papeterie, St. Martin d'Hères 38400

Nom et prénom des Maîtres de Projet (dans l'entreprise / le laboratoire) :  
BOUTILLIER, Benoit  
LAMBERT, Stéphane

**Confidentialité\* :**  aucune  1 an  5 ans

\* Un rapport confidentiel sera communiqué uniquement à l'enseignant correcteur. Pour le communiquer à toutes autres personnes (étudiant, enseignant, personne extérieure) il faudra une autorisation spéciale accordée par le Maître de Projet dans l'entreprise/le laboratoire

# **Modélisation discrète d'un système paravalanches mono-ancrage**



Par Ignacio Olmedo Manich  
Juin 2011

# Remerciements

Tout d'abord je veux remercier le groupe Heaven Climber et le Cemagref pour m'avoir permis d'effectuer ce stage. Réaliser cette étude a été très enrichissant pour moi. J'ai appris en travaillant sur des sujets que j'aime. Je remercie Stéphane Lambert pour son encadrement et son soutien scientifique, Benoît Boutillier pour me permettre de poursuivre sa thèse et pour ses nombreuses réponses par e-mail, Stéphane et Anna pour m'avoir encouragé aux durs moments de modélisation et pour créer une aussi bonne ambiance au bureau.

Je remercie Franck et les stagiaires François, David, Anna, Eva, Louri et Adrien avec les qui j'ai partagé des nombreux repas à la cantine, et des discussions très animées.

J'ai pu finir mon rapport grâce à l'aide de mes colocataires et amis Anne et Julien qui m'ont aidé à corriger le texte. Stéphane et Benoît ont passé beaucoup de temps pour réviser les aspects techniques du texte et aussi les erreurs de grammaire et d'orthographe que le correcteur Word n'arrive pas à trouver.

Finalement, je veux remercier Isarn, mon ami catalan, qui m'a aidé avec la partie administrative, et à ne rien oublier pour ce rapport.

# Sommaire

<u>Chapitre 1:</u>	Introduction.....	2
1.1	Introduction	
1.2	Partenariat Cemagref - Groupe Heaven Climber	
1.3	Les systèmes paravalanches	
1.4	Filet paravalanches mono-ancrage	
1.5	Modélisation	
1.6	Site expérimental	
1.7	Essais réalisés	
<u>Chapitre 2:</u>	Neige et avalanches.....	5
2.1	Introduction	
2.2	Types d'avalanches	
2.3	Avalanches : parcours	
<u>Chapitre 3:</u>	Détail des méthodes .....	7
3.1	Description générale du modèle	
3.2	Détail du calcul des forces entre anneaux	
3.3	Modélisation du manteau neigeux	
3.4	Schéma de calcul	
3.5	Stabilité et convergence	
3.6	Paramètres préfixés	
3.7	Schéma du programme	
<u>Chapitre 4:</u>	..Detaille des routines.....	14
4.1	Description	
4.2	Position des particules de la structure	
<u>Chapitre 5:</u>	Résultats et perspectives.....	23
5.1	Résultats simulations	
5.2	Résultats essais, perspectives	
<u>Chapitre 6:</u>	Conclusions.....	26
<u>Chapitre 7:</u>	Bibliographie.....	28
<u>Annexes</u>		
Annexe 1 :	Nomenclature.....	29
Annexe 2 :	Liste de routines.....	32
Annexe 3 :	Données demandées.....	33
Annexe 4:	Description des routines.....	35
Annexe 5 :	Schéma de blocs du programme .....	39
Annexe 6 :	Résumé des hypothèses considérées.....	40
Annexe 7 :	Caractéristiques géométriques du cadre extérieur.....	41



# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Introduction

Ce document résume le travail réalisé pendant le projet de fin d'études d'une durée de cinq mois. Il a été encadré par le Group Heaven Climber et le Cemagref de Grenoble.

L'objectif de ce stage est la modélisation discrète d'un système paravalanches mono-ancrage en langage Fortran 95/99. Pour sa réalisation quelques visites sur terrain et certains essais de comportement des matériaux ont été effectués. Mais le principal travail a surtout été l'écriture du code et la vérification des résultats.

Ce rapport présente les méthodes de calcul, les hypothèses considérées et le fonctionnement du programme sont présentés. Dans les annexes sont décrites de façon plus détaillées les routines et toutes les variables utilisées. Ce document peut être utilisé comme une aide à la compréhension du code.

### 1.2 Partenariat Cemagref – Groupe Heaven Climber

Ce stage a été encadré par le Groupe Heaven Climber en partenariat avec le Cemagref. C'est un bon exemple de collaboration entre une entreprise privée et un centre de recherche.

En 1991 l'entreprise **Heaven Climber** a été créée pour travailler sur la mise en place de systèmes de protection contre les risques naturels. Ces systèmes protègent personnes et biens. Maintenant, c'est un groupe constitué de 27 entités en France, en Espagne et en Andorre.

Le groupe Heaven Climber réalise des travaux spéciaux, travaux d'accès difficile, de soutènement, de fondations spéciales (pieux et micro-pieux), développement et installation d'écrans pare-pierres et de protection paravalanches. Le bureau impliqué dans ce projet a été le centre de Pont de Claix, qui travaille sur la région Rhône-Alpes. Cette région est particulièrement sensible aux risques naturels, surtout aux chutes de bloc et aux avalanches.

Le **Cemagref** est l'institut de recherche en sciences et technologies pour l'environnement. C'est un centre pluridisciplinaire de chercheurs et ingénieurs qui travaillent sur les domaines des risques naturels (crues, inondations, avalanches, feux forêts...), la surveillance des milieux aquatiques, technologies propres, l'aménagement du territoire et l'économie et sociologie de l'environnement. Le Cemagref est composé de 9 centres en France et 20 unités de recherche différentes. Ce projet a été réalisé au centre de Grenoble dans l'unité de recherche ETNA (Erosion Torrentielle, Neige et Avalanches). L'ETNA travaille sur l'étude des chutes de pierres et les avalanches : de l'étude physique de ces effets jusqu'aux structures et systèmes de protection.

Ce projet de fin d'études a été encadré par M.Benoit Boutiller (Ingénieur, Groupe Heaven Climber) et Stéphane Lambert (ingénieur chercheur, Cemagref). Il reprend la thèse de M. Boutillier, "Instabilités nivologiques : interaction entre un manteau neigeux et une structure paravalanche souple", dans laquelle a été modélisé l'interaction entre un filet multi-ancrage et la neige. L'objectif est d'adapter la modélisation faite au cours de cette thèse à une structure mono-ancrage.

### 1.3 Les systèmes paravalanches

Les systèmes paravalanches ont la fonction d'assurer la sécurité des personnes et des biens contre les avalanches. Il y a plusieurs types de systèmes paravalanches. Ils sont classés selon qu'ils soient permanents ou temporaires et selon qu'ils soient passifs (où l'objectif est de réduire les effets dévastateurs des avalanches) ou actifs (qui ont pour objectif d'éviter le déclenchement des avalanches). Un exemple d'ouvrage paravalanche passif sont les digues de déviation ou de contention. Dans le groupe des systèmes actifs on trouve des systèmes permanents, comme les filets ou les claies et les râteliers, ou les non permanents comme les dispositifs de déclenchement préventif d'avalanche AVALHEX®.



Photo 1 : Système paravalanches active non permanent Avalhex<sup>®</sup>

Les systèmes paravalanches actifs permanents (type râtelier, claie ou filet) sont les systèmes les plus utilisés en France. Ce sont les plus anciens et leur rapport coût/efficacité est aussi très bon par rapport aux autres systèmes. Les filets ont été fortement développés grâce à leur meilleure insertion paysagère. Par ailleurs, la loi française ne permet pas le déclenchement préventif d'avalanches aux alentours des zones habités.

Par rapport aux autres systèmes paravalanches, les filets sont moins chers mais le prix est encore élevé due à la difficulté de mise en place. Réduire le coût de ces opérations de mise en place est une priorité pour les entreprises du secteur. En réduisant le nombre d'ancrages le temps du chantier et son prix peut diminuer notablement, c'est le but de la structure mono-ancrage.

## 1.4 Filet paravalanche mono-ancrage

La structure paravalanche objet de l'étude fait partie des systèmes de protection active permanente. Le filet mono-ancrage a une structure extérieure composée de deux barres horizontales et de deux poteaux qui forment un cadre rigide. Ce cadre rigide supporte une nappe de filet. Cet ensemble constitue un module. Ce type d'installation se compose de plusieurs modules dépendant de la largeur de la pente à stabiliser. Les modules de filets sont unis les uns avec les autres avec des nappes de filet, dans ce cas sans cadre extérieur (voir photo 2).



Photo 2 : installation du filet mono-ancrage, Val Thorens.

Les modules sont fixés à la pente avec deux barres et deux poteaux qui relient à l'ancrage. Les poteaux sont appuyés sur le sol, sans être ancrés.

La plus importante caractéristique du filet mono-ancrage est la simplicité de sa mise en place en comparaison avec d'autres systèmes paravalanches actifs. Le système mono-ancrage n'a besoin que d'un ancrage amont par module. Un ancrage peut supporter à peu près 6 mètres linéaires de filet. Les autres systèmes de filet paravalanches ont besoin de six ancres au sol pour couvrir la même distance. L'avantage de cette solution se porte sur le coût de la fourniture et le temps d'installation.

La nappe est construite avec un filet à base d'anneaux en acier. Les liaisons entre les anneaux ne sont pas fixes. Ils sont entrelacés et peuvent se déplacer les uns par rapport aux autres. Le filet à anneaux est très utilisé pour les systèmes pare-blocs. On peut différencier deux types ; le filet 6+1 où chaque anneau est en contact avec 6 autres et le 4+1 où chaque anneau a 4 voisins. La nappe étudiée est de type 4+1. En comparaison avec d'autres types de filet, ceux composés par anneaux ont l'avantage d'avoir une meilleure capacité de déformation.

## 1.5 Modélisation.

Ce document présente la modélisation discrète du filet paravalanches mono-ancrage en langage Fortran 95/99.

D'un coté il y a la modélisation du manteau neigeux, parallèlement il y a la modélisation de la structure paravalanches, et finalement il y a une partie du code gérant entre les deux. Cette façon d'organiser la modélisation permet obtenir des résultats avec des conditions détaillés du manteau et du filet. Donc le programme nous permet de définir en détail les caractéristiques de chacun.

Les ouvrages de type filet mono-ancrage ont aucune similitude avec les filets conventionnels. Donc la partie du code qui définit la structure a été complètement changée par rapport au code de la thèse de B.Boutiller. Par contre, la modélisation du manteau faite reste valide.

La modélisation doit être la plus précise possible avec un temps de calcul raisonnable. Donc ces deux prémisses sont la base de ce projet.

## 1.6 Site expérimental

Le filet mono-ancrage développé par le group HC a été mis en place pour la première fois à Val Thorens où un module du filet a été instrumenté. Pendant la saison 2010-2011, on a obtenu des données d'hauteur du manteau neigeux, la force à l'ancrage, la force du câble supérieur et inférieur et la force au poteau. Autres données météorologiques sont obtenues pour corriger les valeurs d'hauteur de neige.

Le module équipé avec les capteurs a quatre câbles pour soutenir le cadre. Par contre, les modules non instrumentés ont deux câbles et deux barres.

L'obtention d'autres données relatives au manteau était prévue à partir des sondages réalisés par le personnel de la station de ski. Due au manque de précipitation de neige pendant la saison 2010/11, aucun sondage n'a été réalisé. L'acquisition de données va continuer pendant la saison 2011/12, avec des sondages si les conditions d'enneigement le permettent. Les sondages sont réalisés en deux emplacements : un où les caractéristiques de manteau neigeux sont similaires à celui du module étudié, et un autre dans une zone neutre de toute influence du filet.

L'information obtenue doit servir pour comparer des résultats avec la modélisation numérique, pour la valider et/ou l'améliorer.

## 1.7 Essais réalisés

Pendant la réalisation du stage on a considéré nécessaire de réaliser des essais sur les anneaux constitutifs du filet pour connaître son comportement. On ne veut pas utiliser les résultats des essais pour modifier l'algorithme. On accepte les limitations de la loi de comportement utilisé dans la modélisation. Les résultats servent pour évaluer qualitativement l'erreur liée aux hypothèses prises.



# Chapitre 2

## Neige et avalanches

### 2.1 Introduction

Les conditions de chaque chute de neige sont toujours différentes puis chaque particule de neige a des caractéristiques particulières. Les caractéristiques du manteau dépendent des conditions pendant les chutes de neige mais surtout de l'évolution des conditions météorologiques et l'influence de certains facteurs externes au cours du temps. Donc, on peut affirmer que le manteau neigeux est toujours en évolution. Le manteau est normalement en repos mais il se produit parfois un déséquilibre qui provoque le départ d'une avalanche. On affirme donc que les phénomènes des avalanches sont liés à des situations d'instabilité du manteau. Il y a quelques paramètres qui donnent des informations sur la stabilité ; le type de particules de neige, les gradients de température, la densité de la neige, la cohésion, le pourcentage d'air dans le manteau, etc...

### 2.2 Types d'avalanches

Il existe deux types de classification des avalanches :

- Elle peut se faire par rapport au type de départ :
  - Départ ponctuel : Le mouvement de la neige commence en une localisation concrète où se produit une instabilité ponctuelle. Typiquement, ils surviennent après les chutes de neige quand la neige est encore très fraîche en pentes raides ( $> 45^\circ$ ).
  - Plaque : Une quantité de neige en forme de plaque commence à se déplacer en même temps. On peut toujours les différencier grâce à la ligne de fracture visible en amont. Le déclenchement se produit à cause de qu'une couche de neige qui glisse sur une couche inférieure avec peu de cohésion. La majorité des avalanches de plaque se produisent en pentes comprises entre 35 et 45 degrés.
- Ou par rapport au type d'écoulement:
  - Écoulement de neige dense : la masse volumique de la neige est très élevée (50-400 kg/m<sup>3</sup>) et le mouvement est assez lent. Ces avalanches sont destructives à cause de leur densité élevée. On trouve souvent des matériaux (arbres, cailloux...) dans zones de dépôt des avalanches.
  - Avalanches d'aérosol : Se caractérisent par une masse volumique de la neige très faible (environ 1 kg/m<sup>3</sup>) pendant l'écoulement, et une vitesse élevée (régime turbulent) entre 100 et 300 km/h. Les avalanches d'aérosol se produisent en conditions de froid après de fortes chutes de neige.

### 2.3 Avalanches : parcours

On peut identifier différentes étapes dans le mouvement des avalanches. La première étape d'une avalanche est le **départ**. Dépendant de son type (déjà commenté en 2.2), la zone de départ sera soit ponctuelle soit une surface plus ou moins grande si c'est un départ de plaque. Cette étape se caractérise pour l'incrément de la masse en mouvement et pour une accélération positive.

La deuxième étape est l'**écoulement**, l'avalanche maintient sa vitesse et la quantité de masse de neige reste constante.

La troisième et dernière étape du mouvement d'une avalanche est le **dépôt**. La neige décélère jusqu'à s'arrêter créant une zone de dépôt.

Cette classification est très pratique pour parler des différents dispositifs paravalanche. Les systèmes de protection active sont toujours installés dans la zone de départ. Par exemple, les systèmes de déclenchement préventifs d'avalanche (systèmes de protection temporaire active) de type Avalhex<sup>®</sup> sont installés à proximité des pentes avalanches. De la même façon, les systèmes actifs permanents du type filet étudié dans ce document sont aussi placés dans les zones de départ.

D'un autre côté, les systèmes passifs, de type digues ou tas freineurs par exemple, sont mis en place dans les zones d'écoulement et de dépôt des avalanches. Le but de ceux-ci est de réduire les effets dévastateurs des avalanches en réduisant leur vitesse de l'écoulement ou en modifiant leur trajectoire.

Toutes les structures paravalanches connues comme systèmes de protection active permanentes (râteliers, claies et filets) ont comme objectif d'éviter le déclenchement d'avalanches en stabilisant le manteau neigeux. Cette stabilisation est effectuée ralentissant les mouvements lents de la neige (la reptation) et grâce à sa cohésion.

# Chapitre 3

## Détail des méthodes

### 3.1 Description générale du modèle.

La modélisation discrète du filet mono-ancrage doit commencer par la modélisation de la structure. L'objectif est de définir les nœuds, établir un ordre et avoir leur position initiale. Il est également important de définir les nœuds pour permettre de simplifier les processus d'automatisation du modèle.

La structure est placée sur une pente d'inclinaison donnée,  $\theta$ . Les axes « x,y,z » sont définis comme montré sur la *figure 1*. L'axe « x » suit la direction de la pente. Le point de référence O (0, 0,0) est placé à la base de la structure et à gauche (en regardant d'amont en aval)

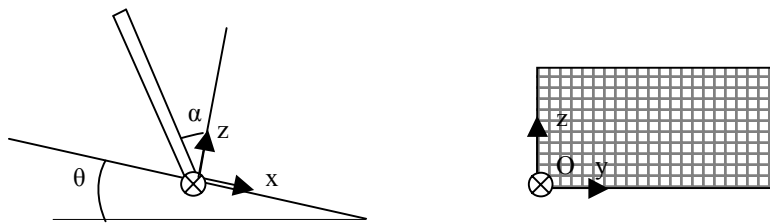


Figure 1. Axes et point de référence O.

Les axes définissent une inclinaison par rapport à l'horizontal  $\theta$  (pente). Il y a un angle,  $\alpha$ , entre l'axe z et l'ouvrage. La structure du filet mono-ancrage peut être composée d'un ou plusieurs modules. Le module de la structure métallique est rectangulaire avec deux poteaux et deux barres horizontales qui entourent le filet d'anneaux (voir *photo 3*). Les modules sont unis entre eux par nappes de grillage sans cadre métallique extérieur.



Photo 3 : vue d'un module depuis l'amont

Le programme a été prévu pour des filets paravalanches d'une longueur maximale de dix modules.

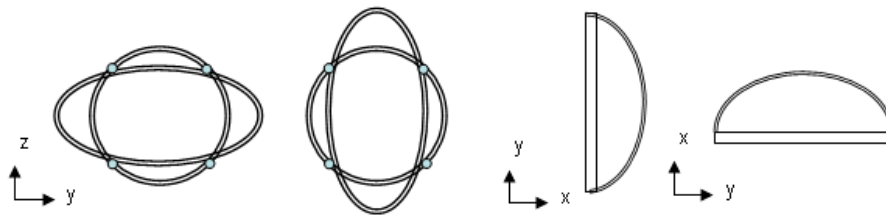
### 3.2 Détail du calcul des forces entre anneaux

Le filet composé d'anneaux présente certaines complexités par rapport au mouvement des éléments et aux forces entre eux. La première difficulté rencontrée au moment de modéliser la nappe été le type de liaison entre les anneaux. Ils ne sont pas fixés par un point, ils sont entrelacés et ils glissent les uns par rapport aux autres (*photo 4*).



*Photo 4 : liaisons entre anneaux et maille hexagonale*

Par ailleurs, les anneaux ont une grande capacité de flexion. On observe qu'il existe toujours une déformation de l'anneau dans son propre plan et aussi une flexion hors du plan de l'anneau s'il y a une force normale au plan de l'anneau. La *figure 2* montre les différents types de flexion des anneaux sont décrits.



*Fig 2. Axes de déformation possibles par flexion des anneaux*

Chaque anneau est en contact avec quatre anneaux voisins (ou trois pour le cas des anneaux placés aux bords du filet). Pour la suite, les éléments de la structure sont définis par les points de contact entre les anneaux. Chaque anneau est défini par quatre points en relation avec d'autres. L'anneau est représenté par une forme carrée au lieu de la forme circulaire. Pour le calcul des déplacements et des efforts, on va négliger la flexion en dehors du plan de l'anneau en acceptant que les anneaux peuvent perdre la coplanarité de ses points. Cette supposition est résumée par l'*hypothèse 1*.

Hypothèse 1 : Tous les points appartenant au même anneau restent toujours coplanaires. On suppose qu'il n'y a pas efforts de flexion en dehors du plan de l'anneau.

Hypothèse 2 : Les liaisons entre anneaux sont des points fixes, il n'y a pas de glissement.

Quelques études sur le comportement des anneaux ont été faits et présentés [*Géomécanique des instabilités rocheuses, Lambert et Nicol*]. Dans cet étude les anneaux étaient définis par un point central. On n'a pu pas utiliser cette façon de définir les anneaux parce qu'au centre il n'y a pas d'interaction manteau-structure. Donc, on été obligé à définir les anneaux par ses points d'attachement. La déformation des anneaux commence par son ovalisation, à partir de là, ils souffrent une déformation élasto-plastique.

La déformation de la nappe a donc une évolution dépendant des efforts appliqués qui n'est pas facile à modéliser. Pour cette raison, on a adapté une loi élastique à la courbe de force-déplacement réelle. Pour meilleur connaître ce courbe, des essais de traction sur des anneaux ont été réalisés. Les détails sur ces essais sont commentés plus tard en ce rapport (5.2).

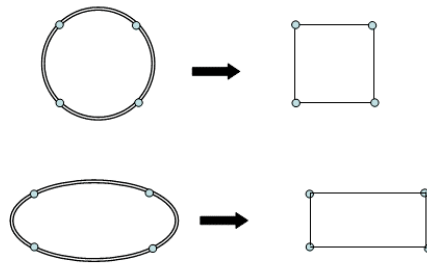


Fig 3. Simplification d'un anneau en utilisant un cadre. En bas, exemple de déformation et sa modélisation.

Initialement on a considéré une loi élastique linéaire qui dépend du paramètre coefficient de rigidité. Ce coefficient dépend directement du Module d'Young et de la section. La section est considéré constante pendant la déformation.

On ne prend pas en considération le grillage à maille hexagonale posé sur la nappe d'anneaux (voir photo 4). Ce petit grillage est secondaire et son effet sur le fonctionnement du système paravalanche est négligé dans cette étude.

### 3.3 Modélisation du manteau neigeux

Dans les chapitres antérieurs a été détaillée la modélisation de la structure et sa interaction avec la neige. Ensuite se précise le modèle mathématique utilisé pour le manteau neigeux.

Le manteau est toujours l'ensemble de différentes couches avec des propriétés propres (température, type de particules de neige, humidité, densité...). Chaque couche ou strate a une épaisseur déterminée. Les données des caractéristiques du manteau sont obtenues avec des sondages réguliers.

Hypothèse 3 : on considère le sol plat et homogène. On peut ajuster la rugosité du sol pour faire évoluer l'influence de cette hypothèse sur le résultat.

La modélisation du manteau neigeux utilisé dans ce programme est exactement la même que celle utilisée dans la thèse de Benoit Boutillier. Cette modélisation consiste à diviser le manteau en barres trapézoïdales de dimensions (largeur, épaisseur et longueur) fixées. Les caractéristiques nivologiques des barres de la même strate sont toujours égales. La longueur des barres correspond à la distance entre ouvrages. Le nombre d'éléments (barres) par colonne,  $N_{tey}$ , et par ligne,  $N_{tez}$ , restent constants pour tout le manteau. (Voir Fig.4 et Fig.5). La taille des éléments nivologiques (épaisseur et largeur) est définie initialement avec une valeur de 10 cm.

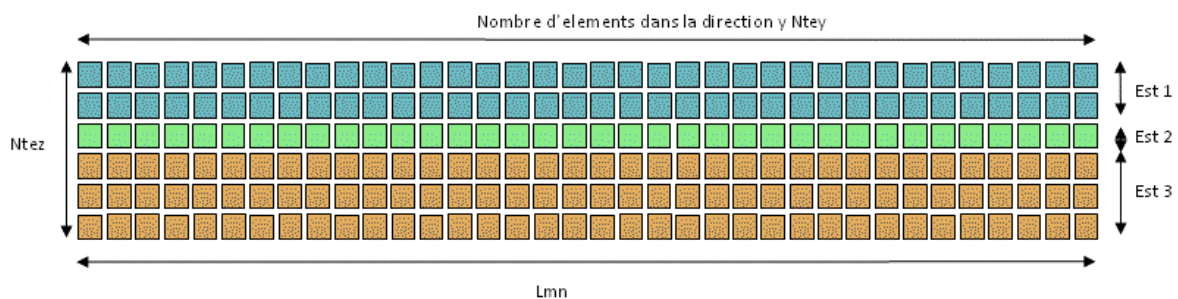


Fig 4. Manteau neigeux composé de barres. Groupes de différentes strates dépendant de la couleur.

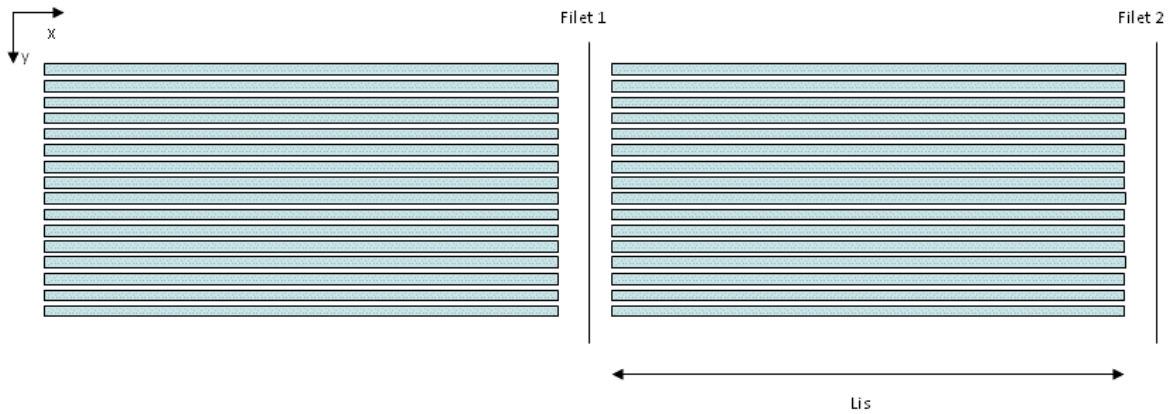


Fig 5. La longueur des éléments nivologiques,  $Lis$ , dépend de la distance entre ouvrages.

Le programme considère les efforts normaux,  $EfN$ , et tangentiels,  $EfT$ , sur chaque plan des barres. Donc le mouvement de chaque élément nivologique dépend des forces qui l'unissent avec ses voisins, son propre poids et l'interaction avec la structure.

On prend l'hypothèse qu'il n'y a pas de pénétration des câbles dans le manteau neigeux, on peut alors affirmer que le déplacement des barres qui sont en contact avec le filet est exactement le même que celui de l'écran.

En considérant le manteau comme un groupe des barres, on trouve qu'il y a des barres qui ne sont pas en interaction avec la structure. Ces barres traversent le filet. Par contre certaines barres "tapent" le filet. Cette différence provoque des forces tangentielles (frottement entre barres) assez grandes. Les forces tangentielles ont une influence déterminante pour la stabilisation du manteau.

### 3.4 Schéma du calcul

La modélisation étudiée est formée par deux groupes de calcul qui sont en interaction permanente. D'un côté on considère le comportement de la nappe par rapport à ses interactions avec le manteau neigeux. De l'autre, le comportement du cadre extérieur où les résultats obtenus du premier calcul sont utilisés. Les déplacements du cadre extérieur déterminent aussi les positions des particules de la nappe. Il y a donc, une relation réciproque entre la nappe et les barres et poteaux de la structure.

Le programme utilise le principe fondamental de la dynamique pour obtenir les valeurs de déplacement à partir des forces sur un point déterminé. Par ailleurs, les valeurs des forces entre points unis par fils d'acier (points voisins dans le filet et le lien ancrage - cadre) sont calculés à partir d'une loi élastique.

Le schéma du calcul itératif des efforts sur l'ancrage et du déplacement de la structure est le suivant :

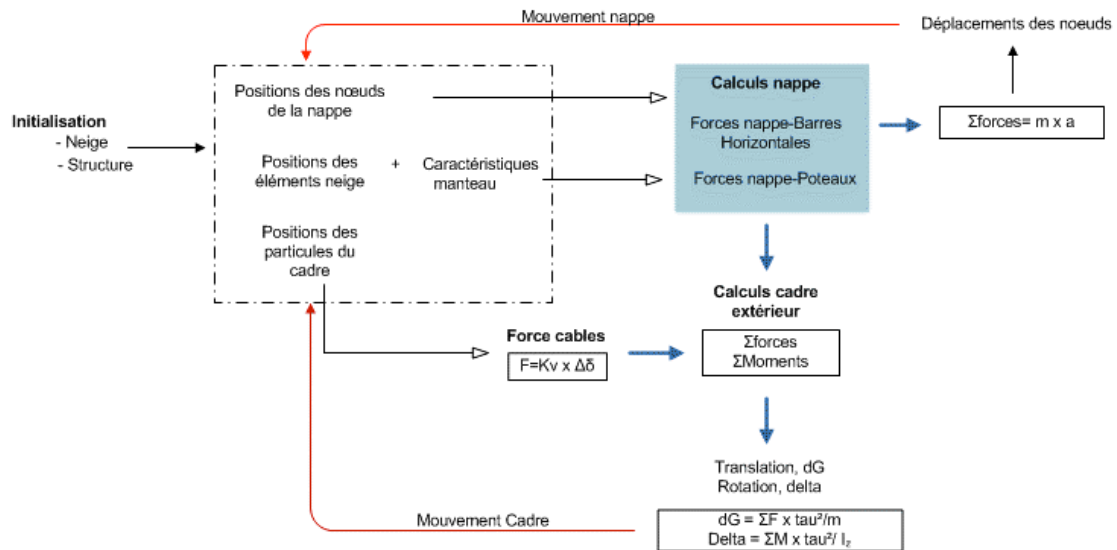


Fig 6 : Schéma de calcul. En rouge, flèches de réalimentation.

### 3.5 Stabilité et convergence

Dans n'importe quelle modélisation, l'objectif est toujours d'arriver à une solution stable. L'accumulation des calculs arrondis doit être examinée afin d'obtenir un contrôle de la propagation des erreurs. Autrement dit, on veut éviter une déstabilisation du système (voir Fig. 7).

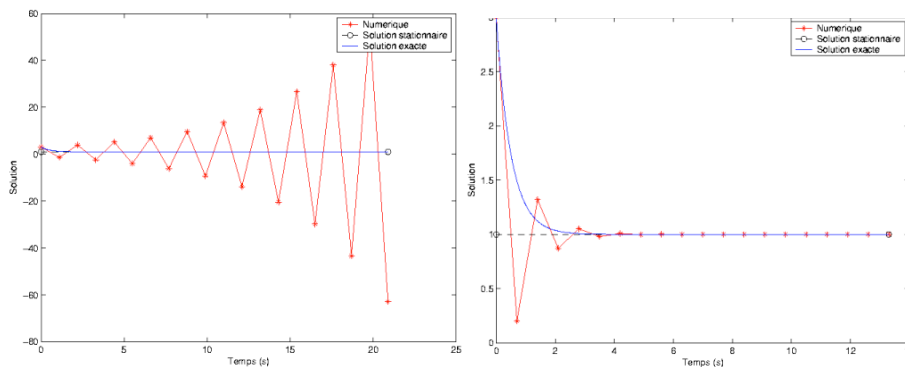


Fig 7. A gauche système instable, à droite, système stable.

Il y a deux méthodes pour forcer la stabilisation du système ; la méthode implicite et la méthode explicite. Dans cette modélisation on a utilisé la méthode explicite car elle est plus précise et est plus facile à programmer. Par contre, la stabilité n'est pas assurée car elle dépend des pas de temps et de l'amortissement.

Si la méthode est stable et constante, elle est convergente donc le processus itératif tend à une solution stable. Pour réussir à obtenir un modèle convergent, on utilise les coefficients d'amortissement (*amort\_n* pour la neige et *amort\_f* pour la structure) et on adapte le pas de temps.

Comme sera commenté dans le point 3.6 de ce document, le coefficient d'amortissement permet d'atteindre plus rapidement la convergence en réduisant la perte de précision des résultats. Donc, on peut conclure que l'amortissement a une influence sur le temps de calcul du programme et aussi sur la stabilité du système.

Plus on diminue le pas de temps utilisé pour la discrétisation plus le temps de calcul augmente. Par contre, en diminuant le pas de temps on aura besoin de plus de temps pour vérifier la convergence. Les caractéristiques des déplacements et efforts des éléments structuraux et des éléments neige sont tellement différents qu'il est nécessaire, pour arriver à un résultat en un temps raisonnable, d'utiliser deux pas de temps différents, *tau* pour la structure, et *tau\_n* pour la neige.

### 3.6 Paramètres préfixés

Pour le bon fonctionnement du programme, différents paramètres sont nécessaires.

- **Coef de pénétration (landa\_penetration)**

Le coefficient de pénétration est utilisé pour caractériser l'interaction entre le nœud de la structure et l'élément neige. Ce coefficient dépend de la facilité du nœud à pénétrer dans l'élément neige. Sa variation s'effectue entre [0...1]. Dans la version générale du code, on a pris une valeur Landa\_penetration de 1 (impénétrabilité des nœuds dans la neige).

- **amort\_f :**

Correspond au coefficient d'amortissement numérique placé devant le déplacement des nœuds du filet. Son objectif est d'optimiser le temps de calcul et d'assurer la convergence du programme. La valeur fixée est de 0,99999.

- **amort\_n :**

Le but de ce coefficient d'amortissement numérique est le même que le précédent mais concerne le manteau neigeux. Sa valeur est fixée en 0,985

- **Paramètres de l'acier : Ea / Rhoa :**

La valeur du module d'Young de l'acier (Ea) prise pour tous les calculs est de  $2 \cdot 10^{11}$  Pa. La masse volumique de l'acier (Rhoa) est fixée à  $7.8 \cdot 10^3$  kg/m<sup>3</sup>. Tous les éléments qui composent le filet sont fabriqués avec le même type d'acier. Le module d'Young a une influence directe sur la loi de comportement élastique des câbles utilisés. Le comportement entre les nœuds du grillage est différent du comportement des câbles qui unissent la structure avec l'ancrage. Pour modéliser cette différence le module d'Young pris pour définir la nappe est inférieur que celui des câbles. En réalité, l'objectif est de corriger la loi de comportement du grillage, qui, selon l'hypothèse 1, n'inclut pas les effets de la flexion sur les efforts entre particules.

- **Tau / Taun/Tau\_mep :**

Ces paramètres correspondent au pas de temps. On peut distinguer un pas de temps pour le calcul du manteau, *taun*, et un autre pour les calculs de la structure, *tau*. La diminution de ce paramètre a une influence directe sur le temps de calcul total du programme et aussi sur la convergence des résultats. Le paramètre *Tau\_mep* correspond à un pas de temps exclusif pour le calcul de la mise en place de la nappe.

### 3.7 Schéma du programme

Le programme est constitué de plusieurs routines qui réalisent des calculs ou tâches.

Les routines sont classées en deux groupes ; un groupe de routines de définition et un autre de méthodes :

- Les routines de définition permettent de décrire la structure et le manteau ainsi que quelques paramètres de caractère général. De cette façon on peut voir qu'il y a des routines « Dg » définition générale, « Df » définition filet, et routines « Dn » définition du manteau neigeux.

Les routines de méthode réalisent les opérations de calcul

Ensuite est décrit l'ordre des routines et les processus itératifs réalisés par le programme.



**Étape 1 :** Initialisation ; saisie des paramètres par l'utilisateur, mise à zéro de certaines variables et construction de plusieurs matrices nécessaires pour le bon fonctionnement des routines qui suivent.

Routines :

- Dg1 – saisie
- Dn1 – saisie\_nivo\_meteo
- Dg2 – Initialisation\_generale
- Df1 – initialisation\_structure
- Df2 – Positions\_initiales
- Df3 – Conditions\_initiales
- Df4 – nœuds\_type
- Df5 – type\_rig
- Df6 – filet\_avant\_deformation

**Étape 2 :**

Ce groupe de routines est utilisé de façon identique pour chaque scénario nivo-météorologique. Ce processus automatique se répète  $N_{pnivo}$  (nombre de scenarios nivo-météo) fois. La première partie est destinée aux routines d'initialisation de la structure et du manteau et petits calculs (Df5, Dn2, M1) suivi d'un processus itératif pour réaliser les calculs (étape 3).

Routines :

- Dn2 – initialisation\_manteau
- Df7 – Mise\_en\_position
- M1.1 – Mise\_a\_jour1

- **Étape 3 :** ensemble de routines qui suivent un processus itératif de  $N_{iter}$  itérations. Les interactions entre le manteau et le filet sont calculées. De la même manière, les efforts sur la structure et ses déplacements sont obtenus.

Routines :

- M1.2 – Mise\_a\_jour2
- M2 – tabl\_contingence
- Dn3 – Calcul\_manteau
- M3 – Calcul\_structure
- M4 – Comportement\_manteau
- M5 – Force\_filet
- M6 – Reaction\_Filet\_Manteau
- **Étape 4 :** Routines réalisées chaque 30 itérations.

Routines :

- M7 – Barres\_horzntales
- M8 – Poteaux
- M9 – For\_Ext
- M10 – Force\_cables
- Dn7 – Pousse\_Manteau
- Dn8 – Poids\_propre\_manteau

- Si n'est pas la dernière itération (l'itération  $N_{iter}$ ) retourne au début de l'étape 3.
- Si est la dernière itération et n'est pas le dernier scénario nivologique retourne au début de l'étape 2.
- Si est la dernière itération et dernier scénario nivologique, fin programme

# Chapitre 4

## Détaille des routines

### 4.1 Description

Les sub-routines les plus importantes de la méthode sont décrites en détail ci-dessous. La modélisation a été faite pour deux types de nappe : une nappe asymétrique et une autre symétrique. La première est le type de nappe qu'on trouve dans les filets réels, la deuxième, est une simplification de la nappe asymétrique. Dans ce chapitre on a décrit le fonctionnement des routines pour la nappe asymétrique (réel). Il y a des petites différences entre les deux dans les routines d'initialisation `Matrice_Module`, `voisinage` et `noeuds_type`.

#### Etape 1 :

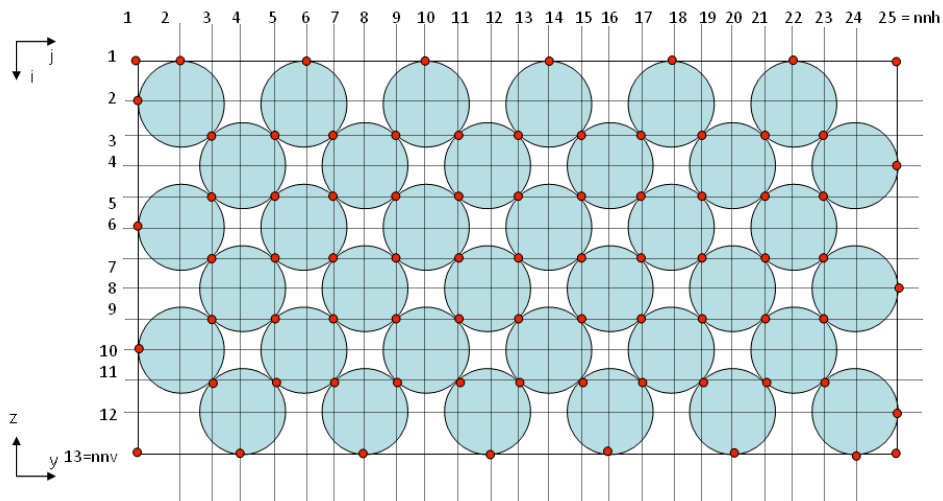
##### Matrice\_module :

Les routines `Matrice_module` et `Ordre_noeuds` font partie de l'initialisation de la structure et sont les routines clés pour le fonctionnement du programme puisqu'elles définissent la structure.

La première routine repère dans l'espace la position des intersections entre éléments métalliques (poutre ou câble). Les particules seront disposées à l'emplacement des ces intersections.

Le module est quadrillé, suivant des lignes horizontales et verticales (*Fig. 8*) de telle sorte que chaque particule se trouve à l'intersection d'une ligne horizontale et d'une ligne verticale. La matrice module a autant de lignes que de lignes horizontales sur le module et autant de colonnes que de colonnes sur le module.  $Nnv$  est le nombre de lignes de cette matrice,  $nmh$ , le nombre de colonnes.

La matrice est remplie de '1' ou de '0'. Les '1' correspondent aux emplacements où il y a une particule et les '0' aux emplacements où il n'y a pas de particule. La taille de la matrice dépend exclusivement du nombre d'anneaux. Le nombre minimum d'anneaux par ligne et colonne est trois.



*Fig.8 : Lignes et colonnes possible par une nappe asymétrique. Les positions des nœuds sont marquées en rouge.*

Les processus automatiques commencent du coin supérieur gauche. De cette façon le numéro de ligne est définie comme «  $i=1$  » pour la barre amont et «  $i = nnv$  » pour la barre en bas. Le processus automatique est réalisé sur l'horizontale (dans la ligne) jusqu' à la fin du module de filet, alors il descend une ligne et commence une autre fois depuis la première colonne.

Cette méthode permet de situer très facilement les nœuds puisqu'il y a beaucoup d'intersections de lignes et colonnes où il n'y a pas de nœuds, surtout aux lignes et colonnes impaires. La méthode d'assignation de nœuds est faite en suivant le numéro de ligne. La position des nœuds par rapport aux lignes dépend de deux conditions : s'il est pair ou impair, et s'il est multiple de quatre.

Pour la suite, on va négliger les barres d'acier entre le module et le sol (voir *photo 5*). Ils servent pour adapter la structure au relief du sol mais on prend l'hypothèse que le sol est complètement plat. On utilise cette considération pour la modélisation du manteau neigeux.



Photo 5. Poteaux du module, appui simple

Pour le modèle de nappe totalement symétrique équivalent à la réel, il y a moins d'anneaux dans le filet. Pour assurer la symétrie des contacts entre la nappe et le cadre il faut supprimer la dernière ligne et colonne d'anneaux du modèle asymétrique (voir *figure 9*).

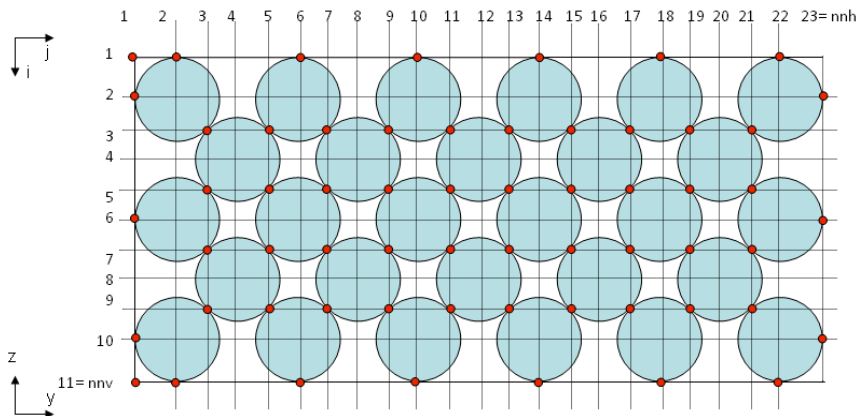


Fig 9. Distribution des positions des nœuds dans un module avec une nappe symétrique.

Comme il a été commenté auparavant, les installations du filet mono-ancrage sont composées de différents modules et sont liés entre eux par des nappes de filet souples. La routine *Matrice\_Module* définit la forme et la distribution des nœuds dans un module. La routine *Ordre\_nœuds* concerne toute la structure filet et tous les calculs suivants aussi.

#### Ordre\_nœuds :

Une fois la matrice des nœuds définie il faut leur donner un nom. En utilisant les mêmes processus automatiques (gauche-droite, haut-bas) on va assigner un numéro de référence à chaque nœud (voir *Fig.10*). Cette sous-routine concerne toute la représentation du filet, les nœuds des extrémités latérales ne sont pas partagés par les modules contigus. Le nombre de nœuds par ligne devient «  $ndm * nnh$  » où  $ndm$  correspond au nombre de modules.

Hypothèse 4 : On considère que tous les filets commencent et finissent avec un cadre métallique.

Curieusement le site expérimental à Val Thorens a une falaise juste au côté droit (en regardant d'haut en bas) et une nappe de filet unis le mur et la structure (voir *Photo 2 droite*) alors la *hypothèse 1* n'est pas vraie pour ce cas. On veut avoir un modèle général, cette particularité n'est pas prise en considération.

Dans cette sub-routine sont définies aussi les matrices  $F_{ij}$ , qui donne le numéro de nœud en introduisant le numéro de colonne et ligne où il est placé ; et  $Cl_{ij}(k,p)$  qui, à l'inverse de  $F_{ij}$ , donne le numéro de la colonne et de la ligne où il est en introduisant le numéro de nœud.  $N_{ijf}$  correspond au nombre total de nœuds du filet.

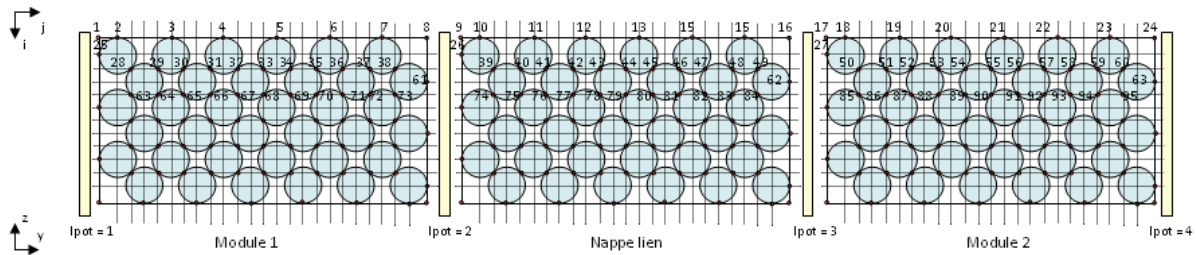


Fig. 10 : Numérotation des nœuds, exemple

**Position\_initiale :**

Hypothèse 5 : Initialement tous les nœuds du filet sont placés dans le plan défini par la structure rectangulaire de barres extérieures.

Hypothèse 6 : Le cadre extérieur est rigide, il ne se déforme pas, par contre il bouge par translation et rotation.

La position initiale des nœuds du filet est définie comme la position sans l'influence des forces (poids et neige). En même temps, il est très important de voir que la dimension de la nappe tendue est beaucoup plus grande que le rectangle extérieur. Il n'y a aucun intérêt à caractériser la position des nœuds en fonction du diamètre des anneaux. Alors une règle de proportionnalité a été utilisée pour avoir une position approximative des nœuds au début du calcul dépendant exclusivement de la longueur et de la hauteur du module.

Entre les lignes et colonnes il peut y avoir deux longueurs différentes en fonction de la position de l'anneau ; le rayon ou le rayon multiplié par cosinus ( $45^\circ$ ). Il faut appliquer la proportionnalité en divisant par la longueur totale de la nappe du filet en tension.

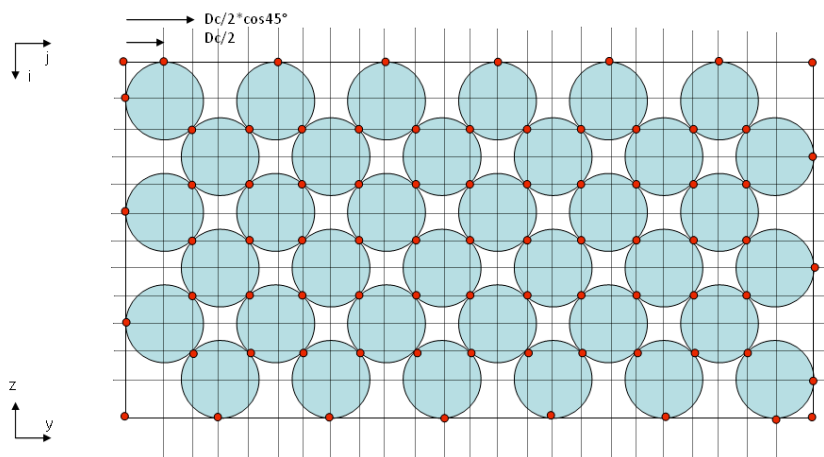


Fig. 11 : Distances entre nœuds

**Nœuds\_type :**

Lorsque les nœuds sont placés il faut différencier les nœuds selon leur type (barre ou filet) et position par rapport à ses voisins. On a identifié 27 types de nœuds différents en fonction des interactions avec les particules voisines. Il y a une maille intérieure très régulière qui est la plus facile à étudier. Par contre, il y a beaucoup de types différents à l'extérieur. Chaque nœud a au maximum quatre voisins. Alors à la fin de cette sub-routine on aura la commande  $Typef(I_{ijf})$  identifiant le type de nœud en introduisant son numéro de référence.

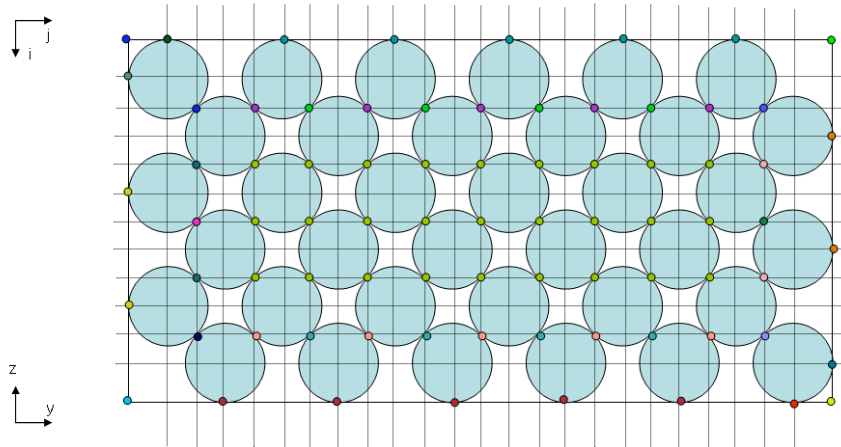


Fig. 12: Groupage des types de nœuds par couleurs

**Type\_rig :**

Après la définition des types de nœuds, on a besoin de définir la matrice de rigidité pour chaque type d'interaction. Comme il est antérieurement dit, les liaisons peuvent être avec le filet métallique ou avec les barres métalliques. Evidemment, les deux systèmes ont des rigidités différentes. On a pris  $Kcf$  pour le filet et  $Kcb$  pour les barres. La rigidité est calculée en fonction du module d'Young de l'acier,  $Ea$ , et de la section du câble,  $Sc$  :

$$Kc = Ea \cdot Sc$$

La position de voisinage est déterminée suivant le sens antihoraire en partant d'en haut.

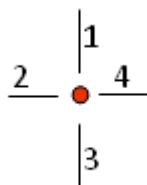


Fig. 13 : Positions de voisinage.

**Voisinage :**

Avec cette sub-routine on définit les 4 nœuds voisins pour chaque nœud. En introduisant le numéro de nœud, il cherche le type de nœud et après donne le nom des nœuds voisins et sa position relative.  $Iijv$  est une matrice avec  $Nijf$  lignes et 4 ( $n^\circ$ voisins) colonnes.

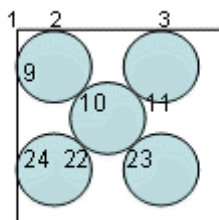


Fig. 14: Exemple de voisinage

Par exemple (voir fig.14), pour le nœud 10 la matrice de voisinage est :  $Iijv(10) = (2,9,22,11)$

Chaque poteau (à l'exception des poteaux des extrémités) a deux colonnes de nœuds, une à gauche et une autre à droite correspondant à deux modules différents. Aucune relation entre les nœuds des bords de poteaux n'a été considérée puisque non nécessaire. Les poteaux des extrémités ont seulement une colonne de nœuds.

### Mise\_en\_position :

Comme il a été commenté antérieurement, initialement tous les nœuds de la nappe sont situés dans le plan du cadre extérieur. Dans ce cas, les distances entre nœuds sont plus petites que celles entre les nœuds quand la nappe est sous tension. L'intérêt de cette étude réside en la déformation élastique de la nappe parce qu'on veut partir d'une position de la nappe juste avant l'apparition des efforts élastiques. Pour la suite, on appellera cette position, position avant-tension.

La routine mise\_en\_position est la responsable du calcul des positions des nœuds quand la nappe est déformée mais sans mobiliser d'efforts entre particules. Pendant ce déplacement, il n'y a pas de forces de rappel entre les particules donc les anneaux ne sont pas fixés les uns avec les autres.

Une accélération orthogonale au plan du cadre (voir Fig 15) est ajoutée pour provoquer le déplacement de la nappe. Le déplacement se réalise jusqu'à ce que la distance entre nœuds soit égale à la distance maximale sans déformation élastique. Cette distance est calculée suivant le schéma des positions (Fig. 11).

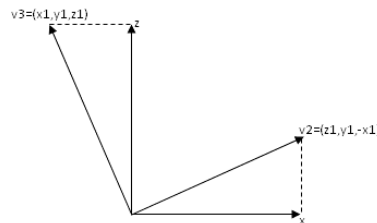


Fig 15. Vecteur du cadre v1, et vecteur accélération v2.

Pour ce processus on a utilisé un pas de temps (tau\_transit) différent du reste du programme. La précision des résultats des positions avant-tension obtenus dépend de ce paramètre tau\_transit.

Le résultat de cette routine est une nappe en forme de parabole dans les plans XY et XZ, voir figure 16.

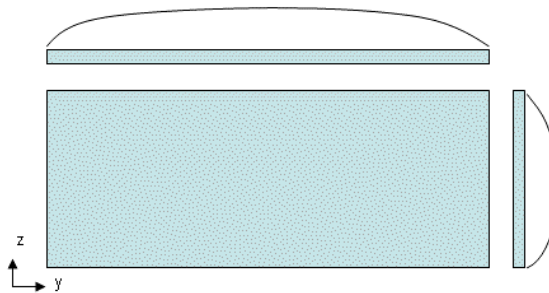


Fig 16. Forme de la nappe dans pré-tension.

### Mise\_à\_jour\_1 :

Dans cette routine, les paramètres de position du manteau sont mis à zéro, également les valeurs de tension tangentielle entre éléments nivologiques.

Tous les déplacements du manteau seront relatifs à la position initiale. Puis, le point de référence des positions du manteau et des positions de la structure n'est pas le même.

### Etape 3 : processus itératif avec Niter itérations

### Mise\_à\_jour\_2 :

Cette routine prend les valeurs du déplacement et rotation du point G (centre de gravité) calculés à la fin de l'itération antérieure pour recalculer les positions de tous les points de la structure et du manteau. Logiquement, à la première itération le déplacement et rotation du point G est zéro.

Pour connaître la nouvelle position des nœuds on a utilisé le système de coordonnées bidimensionnelles polaires. En transformant les coordonnées cartésiennes en coordonnées polaires, on peut calculer plus rapidement les nouvelles positions. La rotation du cadre extérieur est sur l'axe Y, donc on a réalisé la transformation des coordonnées dans le plan XZ. Le centre O (0,0,0) est le centre de référence. Après, la rotation est ajoutée, le programme retourne au système cartésien pour appliquer le mouvement de translation.

#### Tableau\_contingence :

Cette routine est responsable d'établir les relations de position entre la structure et le manteau. On obtient deux matrices de relation ;  $Tcont\_n$  et  $Tcont\_f$ .  $Tcon\_n$  qui donne le nombre de nœuds filet qui sont en contact avec chaque élément neige et ses numéros de référence.  $Tcont\_f$  donne le numéro de ligne et de colonne de l'élément neige qui correspond à un nœud du filet. On peut trouver jusqu'à six particules en contact avec le même élément nivologique.

Pour fournir ces matrices, le programme suit un processus itératif où des coïncidences entre les positions des nœuds du filet et les centres des éléments nivologiques sont cherchées.

La taille du tableau  $Tcont\_n$  est limitée à 12 colonnes. Il faut adapter le gabarit des éléments nivologiques à ceux des anneaux pour ne pas dépasser le nombre de nœuds du filet associés à un même élément nivologique.

#### Calcul\_structureF2 :

Les positions des nœuds de la maille du filet sont calculées en tenant en compte des efforts inter-particulaires, l'interaction avec le manteau et l'amortissement numérique. Les forces de rappel « Frap » sont calculées en suivant le critère élastique :

$$Frap = k \cdot \Delta\delta$$

Les forces de rappel sont toujours de signe positif puisque les câbles ne peuvent pas travailler en compression.

En utilisant l'hypothèse 1, la distance initiale de référence entre les nœuds a été calculée par rapport à la dimension des anneaux, les positions initiales (nappe dans le plan du cadre extérieur, voir *Positions\_initiales* au page 18) ne sont plus utilisées pour le programme. Donc  $\Delta\delta$  est l'élongation de la distance linéaire entre deux nœuds de la nappe.

La valeur de la force d'amortissement numérique « Fa » dépend de l'incrément des distances « L » entre le nœud étudié et ses voisins entre deux instants. Il dépend aussi de  $v$  qui dépend en même temps de  $Ksi$ , le coefficient de réduction pour la stabilité numérique. En résumé, la force d'amortissement numérique sert à éviter les déformations brusques et aide à stabiliser le système.

$$Fa = v \cdot \Delta L / \tau \quad \Delta L = \left[ x_{voisin} \Big|_{(t)} - x_{noeud} \Big|_{(t)} \right] - \left[ x_{voisin} \Big|_{(t-1)} - x_{noeud} \Big|_{(t-1)} \right]$$

Comme il été commenté auparavant, l'objet de cette routine est le calcul des nouvelles positions des nœuds de la nappe. Les nouvelles valeurs sont obtenues avec l'expression suivante :

$$x_{noeud} \Big|_t = x_{noeud} \Big|_{t-1} + coef \cdot (x_{noeud} \Big|_{t-1} - x_{noeud} \Big|_{t-2}) + [G \cdot m + Frap + Fa] \cdot \frac{\tau^e}{m}$$

Où  $coef$  est le coefficient d'amortissement du filet,  $G$  est la gravité,  $\tau$  le pas de temps pour les calculs de la structure et  $m$  correspond à la masse nodale des particules de la nappe. Cette expression est utilisée pour le calcul des coordonnées dans chaque direction des axes.

Les positions des particules de l'intérieur de la nappe dépendent évidemment de la position en l'état antérieur (t-1). Pour le calcul de la nouvelle position, une force d'amortissement est ajoutée. Finalement, l'effet des forces décrites antérieurement est appliqué selon le principe fondamental. De cette façon, on obtient le déplacement des particules en intégrant l'accélération. Pour cette opération, on utilise «  $\frac{\tau^e}{m}$  ».

Etape 4 : Processus itératif réalisé chaque 30 itérations.

### Poteaux :

Cette routine a comme objectif de donner les forces appliquées sur les poteaux afin de pouvoir calculer les efforts externes au cadre extérieur pour estimer son mouvement de translation et rotation.

Chaque poteau contient deux colonnes de nœuds : une dans l'extrémité gauche et l'autre à droite. Les efforts transmis pour le filet sont définis en chaque extrémité. Le poids de l'acier associé à chaque nœud du poteau est aussi ajouté. C'est important d'apprécier que les nœuds à droite et à gauche ne sont pas alignés (voir Fig.17). La pression de la neige n'est pas considérée dans cette routine.

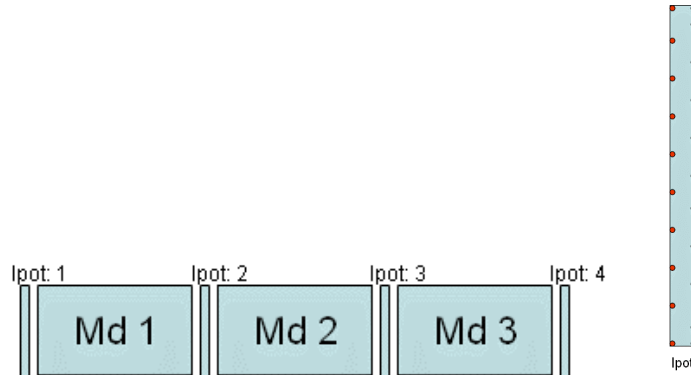


Fig. 17 : distribution des modules et poteaux et colonnes de nœuds pour chaque nœud

### Barres horizontales :

Routine similaire à 'poteaux.f' où se résument les efforts sur les barres horizontales du cadre extérieur. On prend toutes les forces qui sont appliquées sur les nœuds qui appartiennent aux barres horizontales ; les forces de la maille du filet, le poids des barres, la pression de la neige sur l'axe de la pente et le poids de la neige qui est dessus. Il y a des scénarios où la structure est saturée pour la neige et alors la barre supérieure a aussi de la neige dessus. Les résultats sont ensuite utilisés pour calculer les forces extérieures qui affectent le cadre extérieur.

### Forces extérieures :

Routine où la somme des forces extérieures et des moments au point G (centre de gravité du cadre rigide) est calculée. On prend comme forces extérieures, le poids, l'influence de la neige sur les poteaux, la force normale du sol (aussi calculée dans cette sub-routine), les tensions des câbles et barres qui supportent la structure avec l'union ancrage-filet. Avec les sommes des moments et des forces extérieures, le déplacement du point G est obtenu et par conséquent la position du cadre rigide. Pour faire ce calcul, on a utilisé le principe fondamental de la dynamique.

$$\sum \vec{F}_{ext} = m \cdot \vec{a} \quad (1)$$

$$\sum \vec{M}(G) = I_y \cdot \vec{\delta} \quad (2)$$

En intégrant l'équation (1) on obtient le mouvement de translation du point G et donc de toute la structure. De l'équation (2) on trouve le mouvement de rotation du cadre. On voit alors que le paramètre  $\alpha$  (angle du cadre par rapport à la pente) n'est pas constant.

Hypothèse 7 : On considère le contact pied poteau – sol comme un appui simple. Sans résistance de frottement puisque les déplacements sont faibles.

Hypothèse 8 : On n'a considéré que l'inertie du cadre rigide extérieur «  $I_y$  » reste constant pendant le mouvement. On peut prendre cette considération puisque le mouvement angulaire est faible.

En tenant compte l'hypothèse 8 on a obtenu l'expression suivante pour le moment d'inertie sur l'axe y (axe de rotation) du cadre :



$$I_y(G) = Rhoa \cdot \cos^2 \alpha \cdot Hpot^3 \cdot (Lmf \cdot Sbh + Spot \cdot Hpot \cdot \cos^6 \alpha)$$

La pression du manteau neigeux sur les poteaux est fixée à partir des hauteurs des strates, son poids volumique et la surface de contact des poteaux. La hauteur du manteau est nécessaire pour calculer le moment sur le centre du cadre. On prend comme approximation que le centre de la pression du manteau sur les poteaux est à la moitié de l'épaisseur totale du manteau.

### Force\_Cables :

Connaître les valeurs de tension des câbles et barres rigides qui unissent le cadre extérieur avec l'ancrage est un des objectifs de cette modélisation. Les données sont celles enregistrées par les capteurs mis en place à Val Thorens.

Les valeurs de tensions sont calculées à partir de l'élongation de ces éléments en connaissant leur constante de rigidité. La longueur des barres et câbles est calculée à partir du déplacement du point G de chaque module et de la rotation sur l'axe "y". En comparant la nouvelle longueur avec la longueur au repos et utilisant la constante de rigidité de la barre ou du câble on obtient la valeur de la tension. Les valeurs obtenues sont utilisés pour la prochaine itération pour le calcul des déplacements.

## 4.2 Positions des particules de la structure

Le calcul des positions et des déplacements des particules est une des tâches du programme. On a déjà commenté leurs processus de calcul, ensuite, l'organisation du programme afin de réaliser les calculs.

La position initiale des nœuds est décrite dans l'étape 1 du programme (voire Fig. 11). Dans la routine *Conditions initiales* on trouve le code d'initialisation des variables *xI1*, *xI2* et *xI3* où elles sont initialisées avec la valeur de *xI0*. Ces trois variables de position sont utilisés en plusieurs routines. Chacune représente la position des particules en différents moments. *XI0* correspond à la position des particules dans le plan du cadre, sans aucune force appliquée.

Par la suite, la routine *Mise\_en\_position* donne les positions des particules quand la maille est en pré-tension. La valeur de toutes les variables de position (*xI1*, *xI2*, *xI3*) prend cette valeur. A partir de cette position de pré-tension le programme commence à faire les calculs des efforts et positions avec toutes les forces extérieures appliqués.

Dans la routine *Mise\_à\_jour2* (décrite au page 19) les positions sont actualisées, cela veut dire que la variable *xI1* est recalculée pour chaque nœud de la structure. Ce calcul de positions est fait en tenant compte du déplacement et rotation des cadres extérieurs des modules. La variable *xI2*, par contre, prend la valeur de *xI1* en l'itération antérieure. En même temps *xI3* prend la valeur de *xI2*.

Après, la routine *Calcul\_structure* permet trouver les nouvelles positions de tous les nœuds de la nappe de filet. Pour faire ce calcul la pression de la neige et les forces de rappel des nœuds voisins sont utilisés. On prend en considération aussi une force d'amortissement numérique *Fa*.

Les positions des points A,A' et B,B' du cadre sont obtenues dans la routine *F\_cables* afin de connaître la tension des câbles qui soutiennent le cadre. Suivant l'hypothèse de rigidité totale du cadre extérieur des modules (*Hyp.6*), ces nouvelles positions sont calculées seulement avec le déplacement du centre de masses G et la rotation par rapport à l'axe "y".

Variable \ Iter.	IT1	IT1 MeP**	IT2	IT3	IT4
<b>xI1</b>	$xI1_{IT1}=xI0$	$xI1_{IT1mep}$	$xI1_{IT2}$	$xI1_{IT3}$	$xI1_{IT4}$
<b>xI2</b>	$xI2_{IT1}=xI0$	$xI2_{IT1mep}$	$xI1_{IT1mep}$	$xI1_{IT2}$	$xI1_{IT3}$
<b>xI3</b>	$xI3_{IT1}=xI0$	$xI3_{IT1mep}$	$xI2_{IT1mep}$	$xI1_{IT1mep}$	$xI1_{IT2}$

Fig 18. Exemple de l'assignation des valeurs des variables *xI1*, *xI2* et *xI3* dans les quatre premières itérations. *xI0* est la coordonnée initiale de la position. (\*\*)Routine *Mise\_en\_position*.

# Chapitre 5

## Résultats et perspectives

### 5.1 Résultats des simulations

Au jour d'écriture de ce document on n'a pas obtenue des résultats définitifs du programme à cause de problèmes avec la convergence du programme et/ou le temps de calcul. De toute façon, on peut déjà analyser quelques résultats des valeurs des forces sur le cadre, du mouvement de la nappe et de comportement des câbles à l'ancrage. On a réalisé les simulations avec la nappe symétrique pour simplifier l'analyse des résultats.

Les premières simulations ont été faites avec un chargement ponctuel au milieu de la nappe en lieu du manteau neigeux. Comme ça, on a pu vérifier le fonctionnement de la partie du code concernant à la structure. Une fois on l'avait vérifié on a ajouté le poids de la neige.

Les simulations avec la neige ont été réalisés avec un manteau neigeux de deux mètres avec un poids volumique uniforme de  $450 \text{ Kg/m}^3$  sur une pente de  $40^\circ$  degrés. Pour ces conditions, on a pu voir que la barre horizontale inférieure du cadre reçoit des efforts significativement plus forts que la barre supérieure. Par contre, les efforts sur les poteaux sont presque égaux. On peut observer que les nœuds qui sont placés aux coins du cadre ne réalisent aucun effort. Cette erreur du programme est conséquence de l'hypothèse 2 (non glissement des anneaux).

Pour vérifier le bon fonctionnement des routines qui concernent à la nappe du filet et son interaction avec la neige, on a analysé les forces de la nappe sur le cadre. On a vérifié que la force totale sur le cadre est du même ordre de grandeur que la somme de la force du manteau sur la nappe et le poids du grillage.

Les mouvements de rotation et translation des modules par itération sont très petits (de l'ordre d'E-9 ou E-10). En l'actualité, on essaie d'obtenir des mouvements du cadre plus élevés pour avoir une évolution des tensions des câbles à l'ancrage plus marquée. La très lente évolution des tensions faite difficile la convergence en un temps de calcul raisonnable.

### 5.2 Perspectives, résultats des essais

Le comportement du filet à base d'anneaux est complexe puisqu'il a une composante élastique et une composante de flexion (ovalisation de l'anneau). L'intérêt des essais a été de savoir quelle partie influence la loi de comportement. Les résultats de ces essais ont permis d'ajuster quelques paramètres concernant à la structure mais surtout ont permis d'évaluer qualitativement les erreurs liées à les hypothèses simplificatrices du modèle. La complexité du comportement de la nappe du grillage est connu et on accepte les limitations du modèle mathématique créé.

On a réalisé plusieurs essais en fixant les anneaux sur deux, trois ou quatre points. Les essais ont été réalisés avec un capteur de force de cinq tonnes et une centrale d'acquisition. On a utilisé des anneaux de la même taille et modèle que ceux qui sont utilisés pour le filet mono-ancrage. Pour compenser le fait que l'étendue de mesure du capteur de force disponible était trop importante pour permettre des mesures fiables sur un seul anneau, on a réalisé les essais avec deux anneaux en parallèle.

On a obtenu des résultats de force pour des incréments de déplacement de 2 mm jusqu'à des allongements totaux de trois centimètres. Pour les essais de deux et trois points, le diamètre des anneaux dans la direction transversale à l'application de la force a été enregistrée pour chaque valeur d'allongement.



Photo 6 : Configuration pour la réalisation des essais sur deux, trois et quatre points.

Les résultats ont donné de courbes de force-allongement assez claires et significatives. On a également obtenu des courbes sur le diamètre transversal à l'axe d'application de la force pour les essais de deux et trois points. Pour l'essai de quatre points, l'étude de ce paramètre n'a pas été considérée utile puisque son évolution est presque nulle.

En augmentant le nombre de points de fixation de l'anneau, sa capacité de flexion est réduite. Dans les courbes force – allongement (Fig.19) on peut observer qu'il y a une partie commune aux trois essais. Cette partie correspond à la composante de flexion. Cette zone est caractérisée par une pente assez faible. Donc, pour une force petite l'anneau se déforme notablement. La courbe de l'essai de deux points maintient cette pente donc on peut dire que la composante de flexion est forte par rapport à la composante élastique de la loi de comportement. Par contre, pour l'essai de quatre points, on voit que, après la zone de déformation par flexion, la pente augmente de façon significative. Cette partie de la courbe correspond à un comportement élastique. Ce changement de comportement est provoqué par la limitation imposé par les points de fixation.

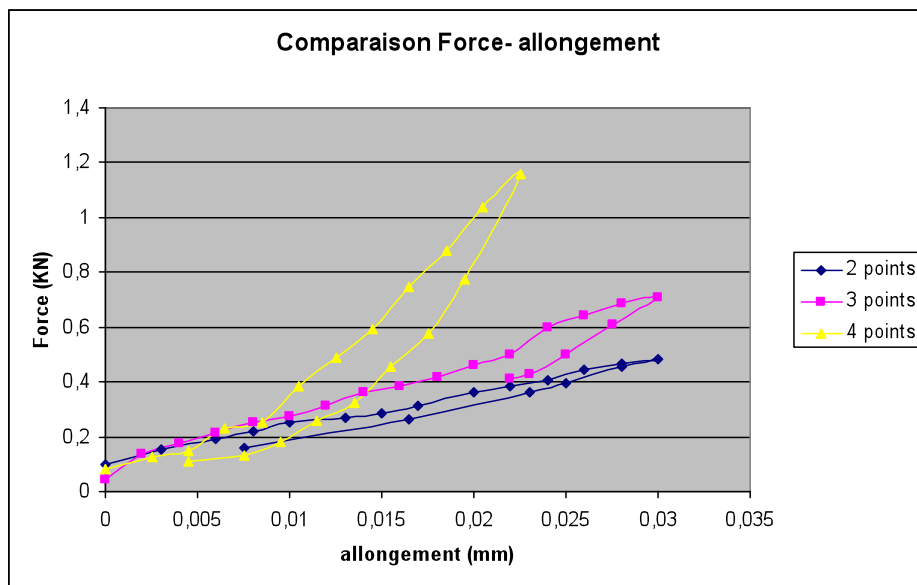


Fig 19. Courbes de force – déformation des trois essais

Après l'essai 4 points, il a été observé que l'anneau n'était presque pas déformé, à l'inverse, après l'essai deux points, l'anneau avait une déformation résiduelle importante. Cette observation confirme les conclusions commentées ci-dessus.

Jusqu'à présent, on a parlé de la force pour se rapporter à la force applique sur l'anneau. En réalité, l'intérêt réside en les forces entre les points de fixation puisque on veut étudier le comportement des câbles du filet. Pour l'essai de deux points, la tension entre les deux particules est directement la moitié de la valeur enregistrée pour le capteur (essais avec deux anneaux). Par contre, pour les deux autres essais on a eu besoin de réaliser quelques calculs géométriques pour obtenir les forces entre les nœuds. Donc, on obtient les d'efforts entre points suivantes.

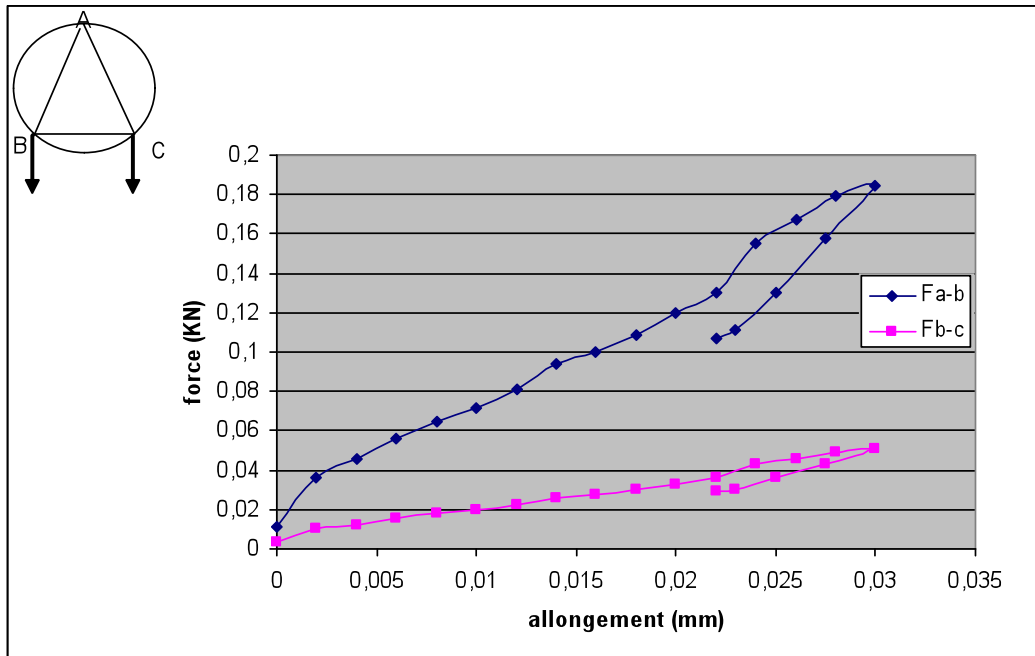


Fig 20. Forces entre points de fixation.

Logiquement, on peut voir que les forces entre les points A et B ou A et C lesquelles prennent l'effort appliqué sur l'anneau. Par contre, la force entre B et C correspond qu'à la composante transversale dérivée de la distribution des nœuds.

Donc, les résultats obtenus confirment que l'influence de la composante de flexion sur les anneaux fixés en deux ou trois points est forte. A l'intérieur de la nappe les anneaux ont 4 points de contact avec des autres donc là l'influence de la flexion est petite par rapport à la composante élastique. Par contre, aux bords de la nappe, les anneaux sont fixés en 3 points, donc l'influence de la flexion est plus grande. Pour une version amélioré du modèle on pourrait créer une loi de comportement pour les anneaux des bords (3 points d'attachement) et une autre pour les anneaux du centre de la nappe.

# Chapitre 6

## Conclusions

La structure étudiée est beaucoup plus complexe que la structure du filet traditionnel (Thèse B.Boutillier) surtout à cause de la complexité du filet. Le filet d'anneaux 4+1 présente des particularités dans son fonctionnement puisque les points de contact entre les anneaux varient tout le temps et aussi présentent des flexions en 3 axes pendant sa déformation. Donc la déformation du filet est un processus très complexe qui doit être étudié avec détail pour pouvoir réaliser des approximations plus précises.

On a défini chaque anneau avec 3 ou 4 points, dépendant de sa position dans la nappe. Donc le comportement des anneaux est assimilé au comportement de cadres ou de triangles. Avec cette approximation on a négligé la flexion des anneaux. On a réalisé des essais de traction sur les anneaux mais on a toujours soumis les anneaux à forces dans son même plan. On ne connaît pas le comportement des anneaux sous un effort orthogonal à son plan.

On a considéré que le contact entre les anneaux est fixe et ponctuel (*hypothèse 2*). Par contre, en réalité le contact entre anneaux est libre, les anneaux glissent. La différence entre la réalité et la simulation est notable sur le comportement des anneaux aux coins du filet. On a observé dans les résultats que ces éléments ne sont jamais sous tension puis que les anneaux voisins prennent tout l'effort. On peut conclure que l'*hypothèse 2* est localement (coins du filet) loin de la réalité. Dans l'absolu, on accepte l'erreur dérivée de cette approximation en connaissant la difficulté de reproduire le mouvement de glissement entre anneaux dans un modèle numérique.

Après l'étude des résultats des essais, on croit opportun de réduire le Module d'Young des particules à l'intérieur du grillage pour compenser l'effet de flexion. Un coefficient de correction de la loi de comportement élastique a été ajouté. En réalité, dans le grillage du filet étudié on trouve des anneaux attachés à des autres par trois ou par quatre points dépendant de sa position dans le grillage (voir *Fig.21*). On a vu que le comportement des deux types de fixation est différent. Donc le programme peut être plus précis en réduisant le coefficient de correction de la loi élastique aux liaisons situées dans la partie bleu de la figure.

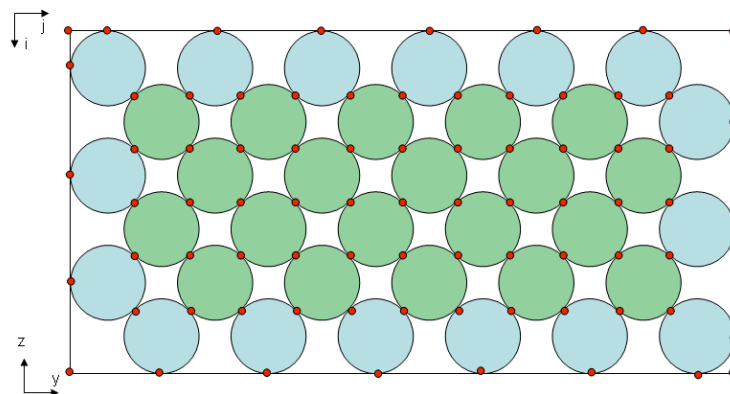


Fig 21. En bleu, anneaux fixées en 3 points, en vert, anneaux fixées en 4 points.

La structure réelle n'est pas totalement symétrique, donc, initialement, pour simplifier l'étude des résultats, on a créé une nappe symétrique qui nous a permis de voir si les interactions entre le manteau et la neige ont été bien calculées par le programme. Une fois cette vérification faite, on a repris la nappe réelle pour la suite.

Au jour d'écriture de ce rapport, le projet n'est pas encore fini. Ensuite on va à commenter les tâches qu'il faudrait faire pour finir la modélisation du filet mono-ancrage et son étude en détail.

Par l'instant et pour simplifier la méthode et l'analyse des résultats, tous les calculs ont été faits sur une structure d'uniquement un module. Le code a été toujours écrit pour réaliser des calculs pour une structure formé par plusieurs modules, avec une limite de 10 cadres rigides. Le temps de calcul va à augmenter proportionnellement au nombre de modules. Les méthodes utilisées pour calculer les efforts et les déplacements des particules des nappes qui unissent les cadres rigides sont exactement égales aux ceux qui sont utilisés à l'intérieur des modules. Donc ce partie

du travail consisterai en vérifier le bon fonctionnement du code et analyser la différence de comportement du filet quand on augmente le nombre de modules.

Les résultats obtenus jusqu'à l'actualité correspondent à des simulations avec des nappes complètement symétriques. On a exposé antérieurement que le model de nappe symétrique a été très pratique pour étudier le fonctionnement du programme et pour localiser les erreurs. Il faudra réaliser des simulations avec la nappe asymétrique, qu'est le type de nappe utilisé en la réalité. En comparant les résultats des deux types de nappe pour des conditions d'enneigement identiques on pourra connaitre de façon qualitative les erreurs dérivés de certaines hypothèses.

# Chapitre 7

## Bibliographie

**Boutillier, Benoit**, 2004. *Instabilités nivologiques : interaction entre un manteau neigeux et une structure paravalanche souple*. Inp-Grenoble

**Compaq compute corporation**, 2001. *Visual Fortran Error messages*. Huston, Texas

**Digital equipment corporation**, 1998. *Digital Visual Fortran. Programmers guide*. Standard and professional editions.

**Huerta, A**, 1998. *Métodos numéricos, Introduccion, aplicacion y programacion*. Universitat Politècnica de Catalunya

**Lambert et Nicot**, 2010. *Géomécanique des instabilités rocheuses*. Hermes science publications

**Rognon, Pierre**, 2006. *Rheologie des materiaux granulaire cohesifs, application aux avalanches de neige dense*. Ecole national des ponts et chaussées.

**Sunsoft**, 2005. *Fortran 90/95 Programming Manual fifth revision*

# Annexes

## Annexe 1: Nomenclature

Pour faciliter la lecture et compréhension, on a établi quelques normes de nomenclature :

Indice :

- $n$  : Est réservée aux paramètres du manteau neigeux.
- $f$  : Est réservée aux paramètres du filet.
- $0$  : Position initiale.
- $1$  : position actuelle.
- $2,3$  : positions futures.
- Nivo : groupe de dix paramètres qui caractérise le manteau de neige.

Il n'y a aucune différence entre les majuscules et minuscules, par exemple  $Ndm$  et  $ndm$  sont exactement la même variable.

Variables utilisés :

<b>VAR</b>	<b>DESCRIPTION</b>
$Al$	Angle de $45^\circ$ en radians
$Alpha(md)$	Angle des poteaux par rapport à la pente
$Alpha0$	Angle initial des poteaux par rapport à la pente
$Amort_f$	Coef. amortissement filet
$Amort_n$	Coef. amortissement neige
$Betaa$	Angle par rapport à la pente du câble ancrage-A
$Betab$	Angle par rapport à la pente du câble ancrage-B
$Daf$	Distance ancrage filet
$Db$	Diamètre des barres ancrage
$Dbar$	Largeur des barres horizontales
$Dc$	Diamètre des anneaux
$Dca$	Diamètre des câbles ancrage
$Delta$	Mouvement de rotation sur l'axe $y$ du module
$DG$	Mouvement de translation du point G
$Diamf$	Diamètre des câbles de la maille
$Diamp$	Diamètre câbles périphériques
$Dpot$	Largeur des poteaux
$Dy0$	Largeur initiale de l'élément nivologique
$Dz0$	Hauteur initiale de l'élément nivologique
$Ea$	Module d'Young acier
$Ebar$	Epaisseur des barres horizontales
$Eft$	Effort tangentiel entre éléments nivo
$Epot$	Epaisseur des poteaux
$Eps$	Epsilon, paramètre de convergence
$F1$	Force d'un nœud de la maille du filet sur un nœud du coté droite du poteau gauche du module $md$
$F2$	Force d'un nœud de la maille du filet sur un nœud du coté gauche du poteau droite du module $md$
$Fa$	Force d'amortissement numérique
$Fbhi$	Force totale sur la barre inf
$Fbhs$	Force totale sur la barre sup
$Ffbhi$	Force exercée pour la maille du filet sur la barre inf
$Ffbhs$	Force exercée pour la maille du filet sur la barre sup
$Fpot$	Force totale (les deux cotés du poteau)



<i>Fr</i>	Force de la maille du filet sur un nœud d'un poteau
<i>Frapp</i>	Force de rappel
<i>Ggm(p)</i>	Gravité décomposé suivant les axes
<i>Gm</i>	Gravité
<i>Ha</i>	Distance point A – pied poteau
<i>Hb</i>	Distance point B – pied poteau
<i>Hf</i>	Hauteur de la nappe de filet
<i>Hn</i>	Hauteur totale manteau
<i>Iy</i>	Moment inertie
<i>Kcb</i>	Rigidité barres
<i>Kcf</i>	Rigidité filet
<i>Kconf</i>	Facteur de confinement latéral
<i>Ksi</i>	Coefficient de réduction pour stabilité numérique
<i>Kv(matrice)</i>	Matrice constante de rigidité
<i>Lai</i>	Longueur cabre ancrage - B
<i>Landa_penetration</i>	Facteur de pénétration
<i>Las</i>	Longueur câble ancrage - A
<i>Lg</i>	Distance entre nœuds g
<i>Lis</i>	Longueur des éléments neige
<i>Lmf</i>	Longueur module de filet
<i>Lp</i>	Distance entre nœuds p
<i>Mfb</i>	Masse nodale barres
<i>Mfm</i>	Masse nodale grillage
<i>Mfp</i>	Masse nodale poteaux
<i>Mn</i>	Masse nivo
<i>Model-rheo</i>	Model Rhéologique
<i>N1</i>	Force normal sur poteau 1
<i>N2</i>	Force normal sur poteau 2
<i>Ndm</i>	Nombre de modules
<i>Nfh</i>	Nombre d'anneaux en ligne/module
<i>Nfv</i>	Nombre d'anneaux en ligne/module
<i>Njff</i>	Nombre total de nœuds du filet
<i>Niter</i>	Nombre d'itérations
<i>Nivo1=nst</i>	Nombre strates
<i>Nivo10</i>	Coefficient B
<i>Nivo2=est</i>	Epaisseur strate
<i>Nivo3=rho</i>	Poids volumique strate
<i>Nivo4=en</i>	Module d'Young strate
<i>Nivo5=coh</i>	Cohésion strate
<i>Nivo6=phi</i>	Angle frottement strate
<i>Nivo7=cohi</i>	Cohésion interface
<i>Nivo8=phii</i>	Angle de frottement interface
<i>Nivo9</i>	Paramètre n
<i>Nnh</i>	Nombre de colonnes/module
<i>Nnv</i>	Nombre de lignes/module
<i>Nor</i>	Force normale au sol totale
<i>NormeA</i>	Norme du vecteur ancrage-A
<i>NormeB</i>	Norme du vecteur ancrage-B
<i>Npnivo</i>	Nombre de scénarios nivo_meteo
<i>Nu</i>	Coefficient d'amortissement numérique
<i>Pas_iter</i>	Pas d'itération
<i>Pn</i>	Poids neige
<i>Pnbhi</i>	Force sur l'axe x de la neige sur la barre inf
<i>Pnbhs</i>	Force sur l'axe x de la neige sur la barre sup
<i>R</i>	Rayon coordonnées polaires
<i>Rhoa</i>	Poids volumique acier

<i>Sca</i>	Surface barre ancrage
<i>Scb</i>	Surface câble ancrage
<i>Scf</i>	Surface intérieure des câbles du filet
<i>Scp</i>	Surface intérieure du poteau
<i>Sigma</i>	Angle coordonnés polaires
<i>SumF</i>	Sommative Forces ext module
<i>SumM</i>	Sommative moments sur G
<i>Ta1, Ta2</i>	Tension des câbles A-ancrage et A'- ancrage
<i>Tau</i>	Pas de temps
<i>Tau_n</i>	Pas de temps neige
<i>Tb1, Tb2</i>	Tension des câbles B-ancr et B'-ancr
<i>Teta</i>	Pente
<i>Typef</i>	Type nœuds du filet
<i>Ui1</i>	Déplacement de l'élément nivologique
<i>Wbh</i>	Poids de chaque barre horizontale
<i>Wni</i>	Poids de la neige sur la barre inf.
<i>Wns</i>	Poids de la neige sur la barre sup
<i>Xa</i>	Position des points A
<i>xAnc</i>	Position de l'ancrage
<i>xB</i>	Position des points B
<i>xIn</i>	Position élément nivologique
<i>xIo</i>	Positions initiales du filet

## Annexe 2 : Liste de routines

Le programme est constitué de plusieurs routines qui réalisent des calculs ou tâches concrètes.

Les routines sont classées en deux groupes ; un groupe de routines de définition et un autre de méthodes :

- Les routines de définition permettent de décrire la structure et le manteau ainsi que quelques paramètres de caractère général. De cette façon on peut voir qu'il y a des routines « *Dg* » définition générale, « *Df* » définition filet, et routines « *Dn* » définition du manteau neigeux.
- Les routines de méthode réalisent les opérations de calcul.

### Routines de définition :

*Générale* : *Dg*. Initialisation générale et rentrée des données

- *Dg1\_Saisie.f*
- *Dg2\_Initialisation générale*

*Manteau neigeux* : *Dn*, Initialisation manteau et rentrée de ses paramètres.

- *Dn1\_Saisie\_nivo\_meteoi.f*
- *Dn2\_Initialisation\_manteau.f*
- *Dn3\_Calcul\_manteau.f*
- *Dn4\_Carte\_rheologie.f*
- *Dn5\_Conditions\_limitesi.f*
- *Dn6\_Calcul\_T.f*
- *Dn7\_Pousse\_manteau.f*
- *Dn8\_Poids\_propre\_manteau.f*

*Structure* : *Df* ; Initialisation de la structure.

- *Df1\_Initialisation\_structure.f*
- *Df2\_Position\_initiale.f*
- *Df3\_Conditions\_initiales.f*
- *Df4\_Nœuds\_type.f*
- *Df5\_Type\_rig.f*
- *Df6\_Filet\_avant\_deformation.f*
- *Df7\_Voisinage.f*
- *Df8\_Mise\_en\_position.f*

### Routines de méthode :

- *M1.i\_Mise\_a\_jour\_i.f*
- *M2\_Tableau\_contingence.f*
- *M3\_Calcul\_structure.f*
- *M4\_Comportement\_manteau.f*
- *M5\_Force\_filet.f*
- *M6\_Reaction\_filet\_manteau.f*
- *M7\_Barres horizontales*
- *M8\_Poteaux.f*
- *M9\_Forces\_ext.f*
- *M10\_Force\_cables.f*

# Annexe 3 : Données demandés

Dans les routines “saisie” et “saisie\_nivo\_meteo”, les valeurs des paramètres qui définissent la structure et le manteau sont demandés à l'utilisateur.

## Paramètres généraux / structure

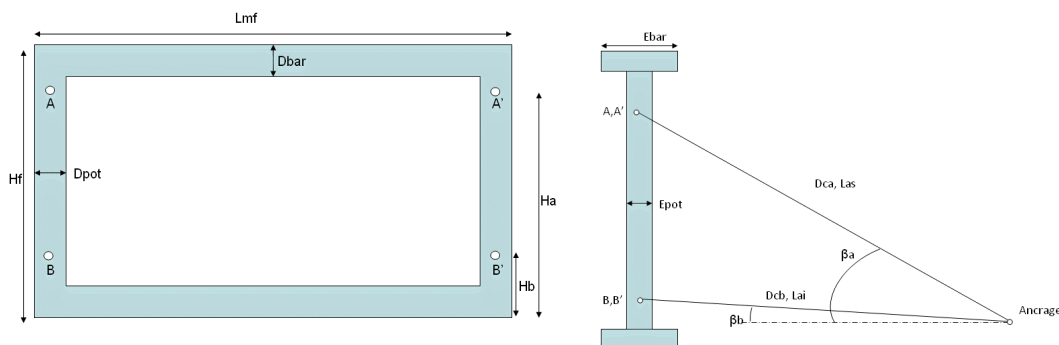
- Hauteur du filet –  $Hf$  -
- Largeur des modules de filet –  $Lmf$  -
- Nombre de modules de filet –  $Ndm$  -
- Angle de la pente –  $teta$  -
- Inclinaison initiale des poteaux –  $alpha0$
- Largeur des poteaux –  $Dpot$  -
- Epaisseur des poteaux –  $Epot$  -
- Largeur des barres horizontales –  $Dbar$  -
- Epaisseur des barres horizontales –  $Ebar$  -
- Diamètre des anneaux –  $Dc$  -
- Nombre d'anneaux/ligne module –  $Nfh$  -
- Nombre d'anneaux / colonne –  $Nfv$  -
- Diamètre des câbles du filet –  $Diamp$  -
- Diamètre câbles ancrage –  $Dca$  -
- Diamètre barres ancrages –  $Db$  -
- Longueur ancrage - point A –  $Las$  -
- Longueur ancrage - point B –  $Lai$  -
- Hauteur sur Poteau du point A –  $Ha$  -
- Hauteur sur poteau du point B –  $Hb$  -
- Distance ancrage – filet –  $Daf$  -

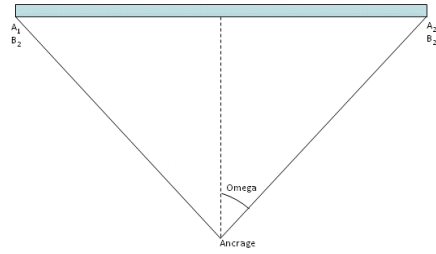
## Paramètres du manteau :

- Facteur de confinement –  $Kconf$  -
- Nombre de scénarios nivo-météo –  $Npnivo$  -
- Modèle rhéologique du manteau neigeux : Choix entre les modèles elasto-plastique parfait (1), viscoélastique (2) ou visqueux (3). –  $i_{rheo}$  -

*Le groupe de données à rentrée ensuite se répètent pour chaque scénario.*

- Nombre de strates : Les prochaines données demandées se répètent pour chaque strate. –  $Nst$  -
  - Epaisseur de la strate -  $Est$  -
  - Longueur des éléments nivologiques ( distance entre ouvrages) –  $Lis$  -
  - Poids volumique : poids volumique moyen –  $Rho$  -
  - Module d'Young de la neige : compris entre 1 et  $10^9$ . Par la suite fixé en  $10^5$ . –  $En$  -
  - Cohésion –  $coh$  -
  - Angle de frottement –  $phi$  -
  - Cohésion à l'interface –  $cohi$  -
  - Angle de frottement à l'interface. –  $cohi$  -





*Paramètres demandés, vues d' hauteur et profil et plante..*

# Annexe 4 : Description des routines

## 3.2.1 Routines de définition :

Générale :

<b>Titre : Saisie.f -Dg1-</b>	
<b>Titre : initialisation generale.f -Dg2-</b>	
<b>Objectif de la sub-routine :</b>	Dimensionnels de la structure et certaines données sur le manteau, choix du modèle rhéologique et des paramètres généraux (élastiques ou visqueux).
<b>Sous programs appelés :</b>	Saisie_nivo_meteo(1,2 et 3)
<b>Processus :</b>	Introduction des données par l'utilisateur et réalisation des calculs nécessaires
<b>Variables initialisées :</b>	Structure G <sub>1a</sub> , H <sub>f</sub> , L <sub>nf</sub> , N <sub>dm</sub> , calcul Nm, Npot, teta alpha, Dpot, hpot, Diamp, Scf Manteau R <sub>h0a</sub> , Kconf, Npnivo Eps - choix modèle rhéologique pour tous les scenarios : - amort_n 1.- elasto-plastique parfait - amort_n 2.- visqueux - amort_n 3.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 4.- visqueux - amort_n 5.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 6.- visqueux - amort_n 7.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 8.- visqueux - amort_n 9.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 10.- visqueux - amort_n 11.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 12.- visqueux - amort_n 13.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 14.- visqueux - amort_n 15.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 16.- visqueux - amort_n 17.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 18.- visqueux - amort_n 19.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 20.- visqueux - amort_n 21.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 22.- visqueux - amort_n 23.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 24.- visqueux - amort_n 25.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 26.- visqueux - amort_n 27.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 28.- visqueux - amort_n 29.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 30.- visqueux - amort_n 31.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 32.- visqueux - amort_n 33.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 34.- visqueux - amort_n 35.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 36.- visqueux - amort_n 37.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 38.- visqueux - amort_n 39.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 40.- visqueux - amort_n 41.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 42.- visqueux - amort_n 43.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 44.- visqueux - amort_n 45.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 46.- visqueux - amort_n 47.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 48.- visqueux - amort_n 49.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 50.- visqueux - amort_n 51.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 52.- visqueux - amort_n 53.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 54.- visqueux - amort_n 55.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 56.- visqueux - amort_n 57.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 58.- visqueux - amort_n 59.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 60.- visqueux - amort_n 61.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 62.- visqueux - amort_n 63.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 64.- visqueux - amort_n 65.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 66.- visqueux - amort_n 67.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 68.- visqueux - amort_n 69.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 70.- visqueux - amort_n 71.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 72.- visqueux - amort_n 73.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 74.- visqueux - amort_n 75.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 76.- visqueux - amort_n 77.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 78.- visqueux - amort_n 79.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 80.- visqueux - amort_n 81.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 82.- visqueux - amort_n 83.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 84.- visqueux - amort_n 85.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 86.- visqueux - amort_n 87.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 88.- visqueux - amort_n 89.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 90.- visqueux - amort_n 91.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 92.- visqueux - amort_n 93.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 94.- visqueux - amort_n 95.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 96.- visqueux - amort_n 97.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 98.- visqueux - amort_n 99.- elasto-plastique et visqueux - amort_n 100.- visqueux
<b>Titre : initialisation structure.f -Df1-</b>	
<b>Objectif de la sub-routine :</b>	Selon modèle choisi, appel de saisie_nivo_meteo correspondant à partir des données générales et de la structure, modélisation initiale de la structure.
<b>Sous programs appelés :</b>	Matrice_module.f Ordre_noeuds.f
<b>Variables initialisées :</b>	-lp et lg -nnv et nnh - matrice Iij -Fij(i,j) -Clij -Nijf - mfm,mfp,mfb
<b>Titre : pos initiales.f -Df2-</b>	
<b>Objectif de la sub-routine :</b>	Fixer les positions initiales des nœuds de la structure. Enregistrement sur la mémoire de xIp, yIp
<b>Variables initialisés :</b>	- xI, xIo, xIp - Lai,Las - Alpha - xA,xB

Structure :

<b>Titre : conditions initiales.f -Df3-</b>	
<b>Objectif de la sub-routine :</b>	Fixer les positions initiales des nœuds et donner la valeur zéro à la matrice des réactions structure-neige.
<b>Titre : noeuds type.f -Df4-</b>	
<b>Objectif de la sub-routine :</b>	Defini le type de nœud dépendant de sa position par rapport à ses voisins et du type de câble entre eux.
<b>Objectif de la sub-routine :</b>	Fixer les matrices Kv pour chaque nœud ou il y a la constante de rigidité dépendant des nœuds voisins.
<b>Variables initialisées :</b>	-Typef
<b>Variables initialisées :</b>	-Kv

○  
Manteau  
u  
neigeux  
:

<b>Titre : filet_avant_deformation.f -Df6-</b>
<b>Titre : voisinage.f -Df7-</b>
<b>Objectif de la sub-routine :</b> Déterminer la matrice de voisinage qui donne les voisins d'un nœud.
<b>Sous programs appelés :</b>
<b>Variables initialisées :</b>
<b>Variables initialisées :</b> -xl -v1,v2,v3
<b>Titre : Saisie_nivo_meteoi.f -Dn1-</b>
<b>Objectif de la sub-routine :</b> L'utilisateur rentre les paramètres qui définissent le manteau. (nivo1 à nivo8 et jusqu'à nivo10 pour modèle visqueux) par chaque scenario nivo-météo.
<b>Variables initialisées :</b> - Nst - est - rho - En - coh - phi

<b>Titre : Initialisation_manteau.f -Dn2-</b>
<b>Objectif de la sub-routine :</b> La taille des éléments nivologiques est calculée pour chaque strate. Le numéro de strate des éléments nivologiques est fixé. Le type d'élément nivologique est fixé par rapport à sa position dans le manteau.
<b>Variables initialisées :</b> - Lmn - Typen - Ntey - Ntez

<b>Titre : Calcul_manteau.f -Dn3-</b>
<b>Objectif de la sub-routine :</b> Dépendant de la valeur i_cond_sol rentrée pour l'utilisateur, le program utilise calcul_manteau-1,2 ou 3. Les projections de la gravité sur les axes XYZ sont calculées pour pouvoir fixer les efforts sur le manteau. Les nouvelles positions des éléments nivologiques sont calculés en tenant compte des poids et de la réaction avec la structure calculée pendant l'itération précédente.
<b>Variables initialisées :</b> - Fresultante - Mn - uI, xI

### 3.2.2 Routines de méthode :

<b>Titre : tableau_contingence.f -M2-</b>
<b>Titre : calcul_structured.f -M3-</b>
<b>Objectif de la sub-routine :</b> Réaliser le calcul de nouvelles positions des nœuds au moyen des positions antérieures ainsi que des forces appliquées sur le nœud. Pour réaliser le calcul de nouvelles positions le poids, la réaction avec la neige et les transformations des câbles sont tenus en compte.
<b>Variables initialisées :</b> - Tcont n - ggm - Fa - Frap - lg, lp, L12 - nu - cont

**Titre : Force\_filet.f -M5-**

Objectif de la sub-routine :

Selon la position d'un nœud situé sur le bord du filet, la force de rappel à la que est soumis le nœud par les câbles.

Variables initialisées :

- xI1, xI2
- typef
- Frap
- lg, lp

**Titre : R.action\_filet\_manteauf -M6-**

Objectif de la sub-routine :

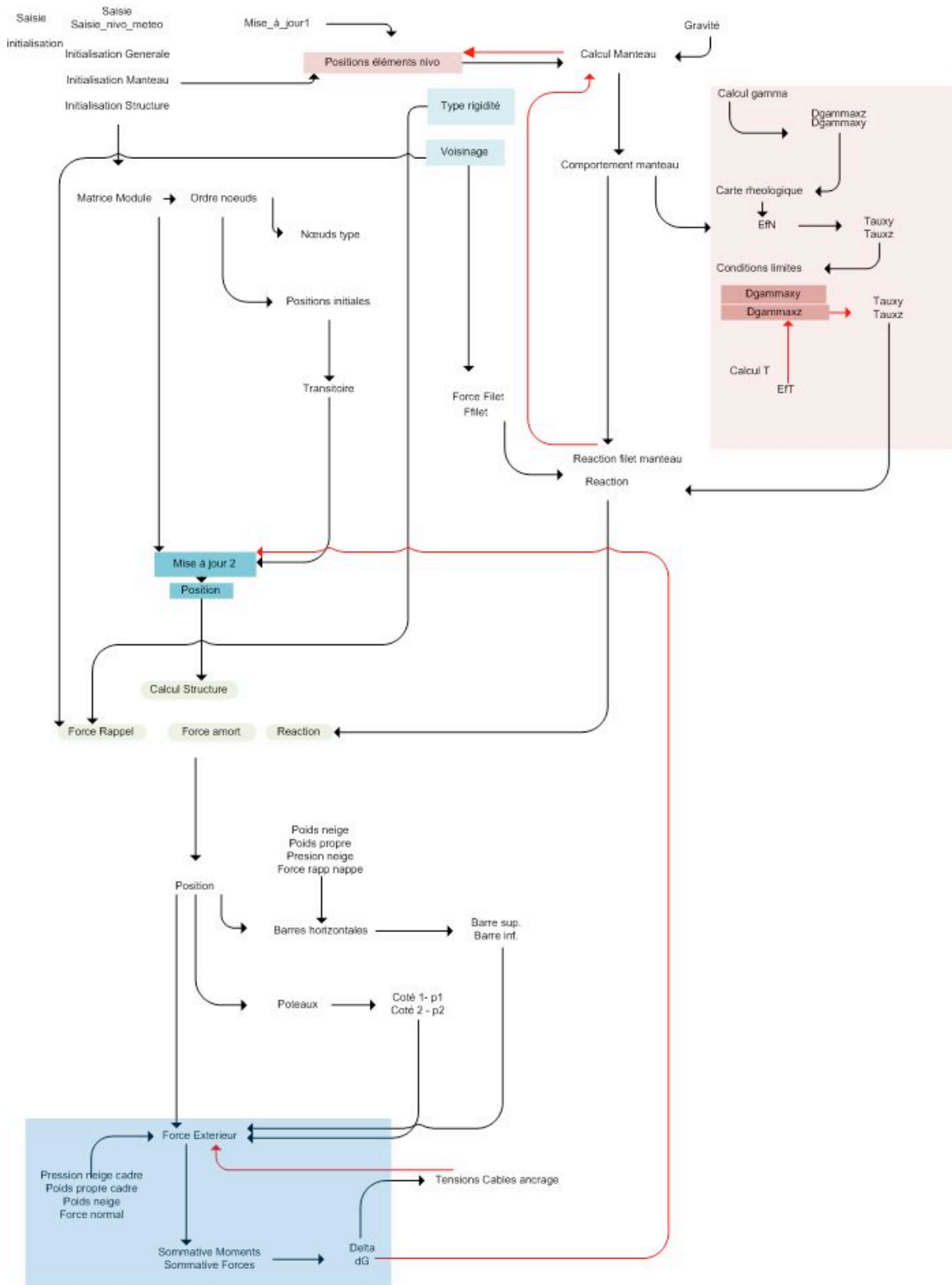
Calcul de l'interaction entre le filet et le manteau. Le paramètre sortant est Réaction qui correspond à l'accélération du nœud.

Variables initialisées :

- xI1, xI2
- Fa
- Frapp
- typef



# Annexe 5 : Schéma du program



# Annexe 6 : Résumé des hypothèses considérées

Hypothèse 1 : Tous les points appartenant au même anneau restent toujours coplanaires donc on suppose qu'il n'y a pas efforts de flexion en dehors du plan de l'anneau.

Hypothèse 2 : Les unions entre anneaux sont des points fixes donc il n'y a pas de glissement.

Hypothèse 3 : On considère que tous les filets commencent et finissent avec un cadre métallique.

Hypothèse 4 : Initialement tous les nœuds du filet sont placés dans le plan défini par la structure rectangulaire de barres extérieures.

Hypothèse 5 : Le cadre extérieur est rigide, il ne se déforme pas, par contre il bouge par translation et rotation.

Hypothèse 6 : On considère le contact pied poteau – sol comme un appui simple. Sans résistance de frottement puisque les déplacements sont faibles.

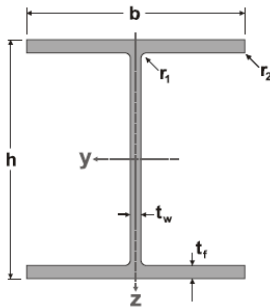
Hypothèse 7 : On n'a considéré que l'inertie du cadre rigide extérieur «  $I_y$  » reste constant pendant le mouvement. On peut prendre cette considération puisque le mouvement angulaire est faible.

Hypothèse 8 : on considère le sol plat et homogène. On peut ajuster la rugosité du sol pour faire évoluer l'influence de cette hypothèse sur le résultat.

# Annexe 7 : Caractéristiques géométriques du cadre extérieur

## Poteaux :

Pour les poteaux un profil HOE 180 est utilisé avec une longueur  $H_f$ , hauteur du module. Le profil HOE180 a les caractéristiques suivantes :



Où  $h=171$  mm,  $b = 180$  mm ,  $t_w = 6$  mm et  $t_f = 10$ mm. Ce profil est placé de telle forme que l'axe Z de la figure suive l'axe de la pente.

## Barres Horizontales :

Pour les barres sont utilisés deux cornières L de dimensionnes 120x120x10 mm.