

PARTIE II

ECHELLE DU SYSTEME CHEVAUCHANT

Chapitre 7

Introduction

7.1 Les prismes d'accrétion

Les prismes d'accrétion sont une caractéristique des environnements en convergence que l'on peut trouver dans diverses régions du globe et dans divers contextes géodynamiques (Figure 7.1). Ils sont composés d'une succession d'écailles tectoniques au front d'une zone de collision ou de subduction. Le prisme des Siwaliks est un exemple actuel de système actif associé à une collision intra-continentale [Delcaillau, 1986a; Delcaillau *et al.*, 1987; Mugnier *et al.*, 1992]; d'autres prismes peuvent être associés à une subduction (Makran, Barbades, Mariannes, Petites Antilles).

La théorie développée par [Davis *et al.*, 1983; Dahlen, 1984; Dahlen *et al.*, 1984] suppose que la géométrie d'équilibre du prisme est celle pour laquelle le matériau le constituant est en tout point à la limite de la rupture au sens du critère de Coulomb. Cette théorie permet de caractériser cette géométrie d'équilibre en fonction des paramètres rhéologiques (coefficients de frottement basal et interne) et géométriques (pendage du décollement à la base).

Cette description mécanique, qui permet de caractériser globalement la géométrie d'équilibre d'un système chevauchant en fonction des paramètres rhéologiques et géométriques de celui-ci, ne permet d'avoir accès ni à la structure et aux déformations internes du système, ni à son évolution temporelle. Des modélisations analogiques (Figure 7.2) [Mulugeta, 1988; Lallemand *et al.*, 1994; Gutscher *et al.*, 1998] ou numériques (Figure 7.3) [Chalarton *et al.*, 1995; Hardy *et al.*, 1998; Burbidge et Braun, 2002] ont permis de reproduire les caractéristiques de ces prismes, en termes de géométrie mais aussi de dynamique d'évolution.

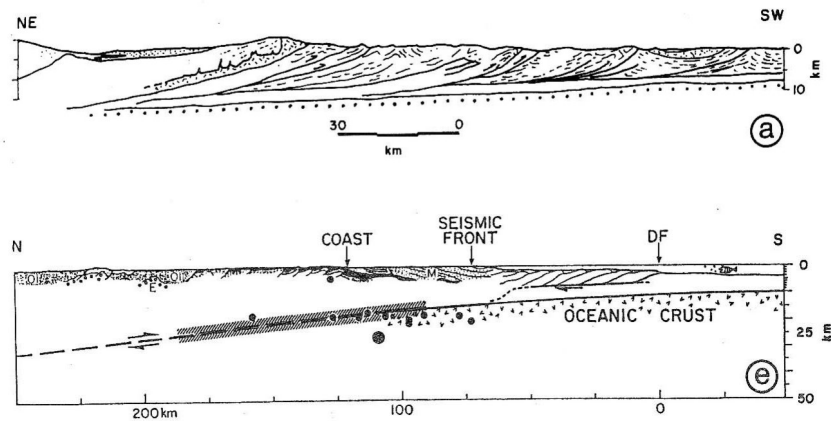


Fig. 7.1 – Exemples naturels de prismes, dans un contexte de collision (en haut : Salt Range au Pakistan) ou de subduction (en bas : Makran). D'après [Davis et Lillie, 1994]

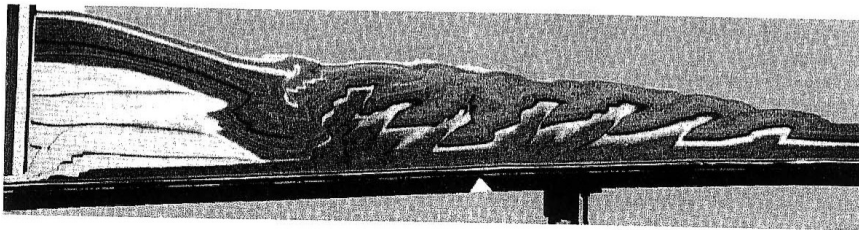


Fig. 7.2 – Modélisation analogique d'un prisme, réalisée avec du sable quartzique. Les horizons colorés initialement horizontaux permettent de suivre la déformation et d'observer la formation d'écaillés chevauchantes. D'après [Gutscher *et al.*, 1998]

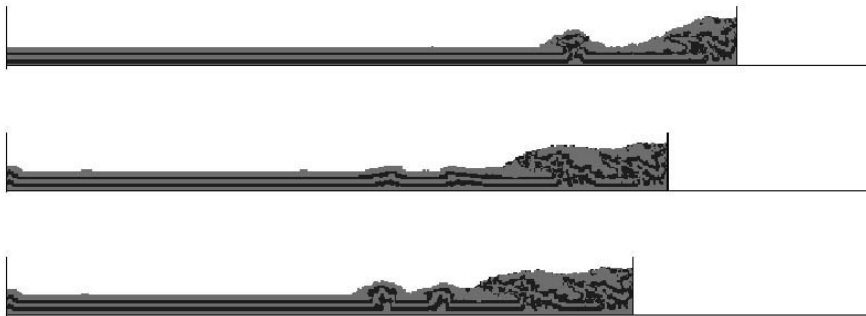


Fig. 7.3 – Modélisation numérique d'un prisme, réalisée en modélisant le matériel entrant dans la composition du prisme par des sphères. Les différentes nuances de gris indiquent des horizons initialement horizontaux. D'après [Burbidge et Braun, 2002]

7.2 Le front Himalayen

Le Front Himalayen est composé de séries continentales détritiques synorogéniques d'âge Mio-Pléistocène déposées dans le bassin d'avant-pays de la chaîne, les séries Siwalik. On observe à ce front plusieurs chevauchements se branchant tous sur un chevauchement unique en profondeur. Trois chevauchements principaux ont été identifiés du Nord au Sud :

- le Main Boundary Thrust (MBT) [Medlicott, 1864], limite Nord des Siwalik avec les formations épimétamorphiques du Moyen-Pays,
- le Main Dun Thrust (MDT) [Hérail et Mascle, 1980],
- le Main Frontal Thrust (MFT) [Gansser, 1964], aussi appelé Main Siwalik Thrust.

Le Front Himalayen est un modèle d'évolution géodynamique de bassin d'avant-chaîne [Delcaillau, 1997]. La sédimentation synorogénique a enregistré la migration au cours du temps des fronts tectonique et orographique et de la plaine de subsidence [Delcaillau, 1992]. Les structures se sont mises en place successivement du Nord vers le Sud selon un schéma comparable à celui des prismes d'accrétion [Hérail et Mascle, 1980; Delcaillau *et al.*, 1987; Mascle et Hérail, 1982] (Figure 7.4). D'après [Delcaillau, 1997], au Népal oriental, l'initiation du MBT daterait d'environ 8 millions d'années, celle du MDT d'environ 3 millions d'années et celle du MFT d'environ 1 million d'années. D'autres auteurs [Meigs *et al.*, 1995; Huyghe *et al.*, 2001] donnent des âges plus anciens pour le MBT, entre 10 et 12 millions d'années, en se basant sur des données sédimentologiques. Au Népal occidental, [Mugnier *et al.*, in press] donnent des âges de 3-2,4 millions d'années pour le MDT et de 2,4-1,8 millions d'années pour le MFT sur la base de relations discordantes entre les différentes unités des Siwalik.

Actuellement, l'activité du MBT est discrète, comme le suggère l'absence d'indices de déformation des nappes alluviales [Delcaillau, 1997]. Lorsque des mouvements actuels sont observés, ils sont plutôt en faille normale ou en décrochement [Mugnier *et al.*, 1999a]. De même, au Népal central, l'absence de déformation des nappes les plus récentes semble indiquer que le MDT est actuellement inactif [Delcaillau, 1997]. En revanche, en Inde du Nord-Est, les séries Siwalik chevauchent les alluvions du Terai [Hagen, 1959] et au Népal occidental, des réactivations récentes sont mises en évidence [Leturmy, 1997]. La sismicité [Ni et Barazangi, 1984; Pandey *et al.*, 1999] ainsi que le décalage de terrasses récentes par des failles [Lavé et Avouac, 2000] montrent que la zone du MFT est actuellement active, avec des vitesses de raccourcissement de 14 - 20 mm/an [Lavé et Avouac, 2000; Mugnier *et al.*, in press].

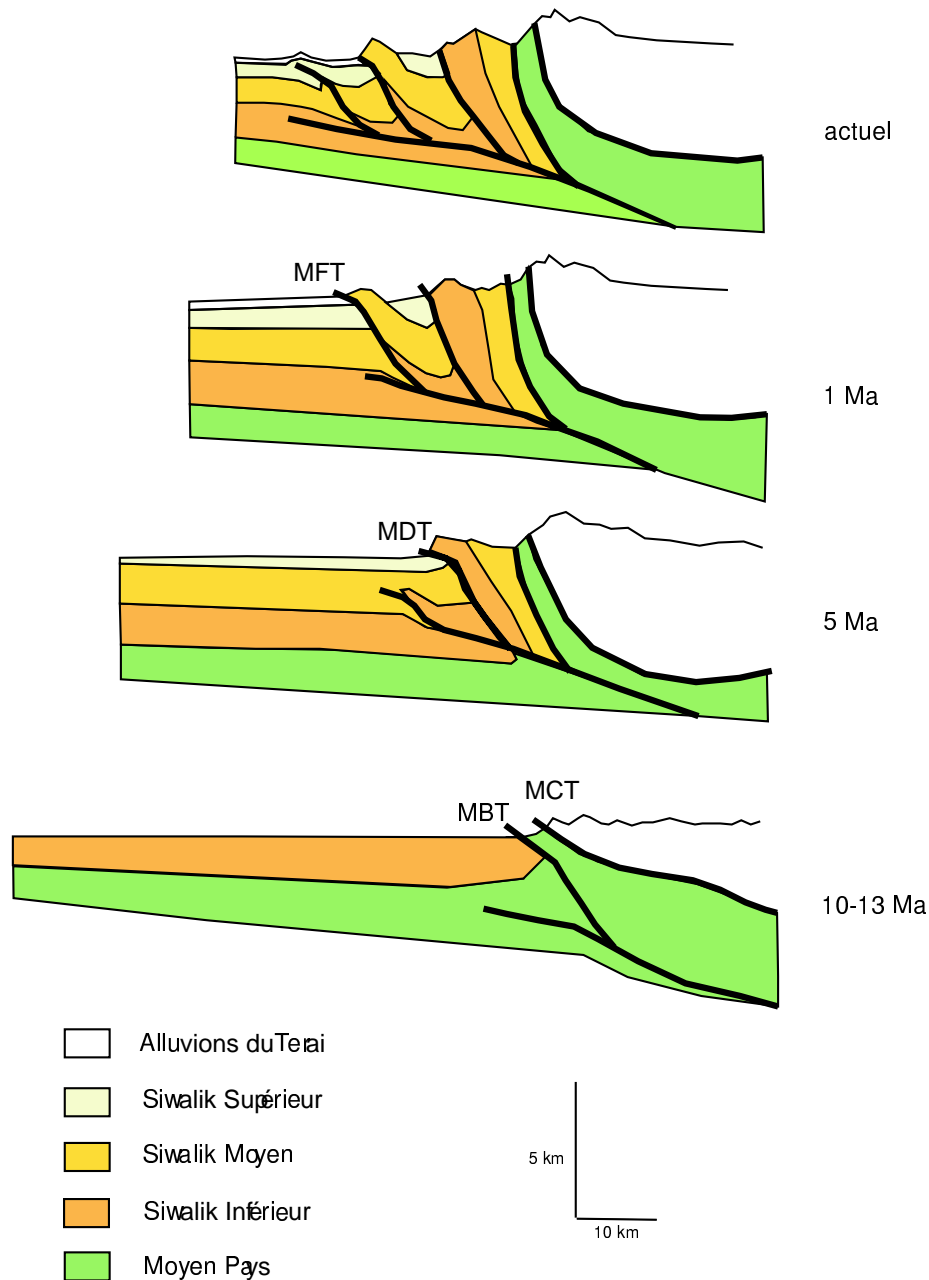


Fig. 7.4 – Reconstitution de l'évolution morphostructurale et tectonosédimentaire de la chaîne de l'Himalaya au Népal. Modifié à partir de [Delcaillau, 1986]

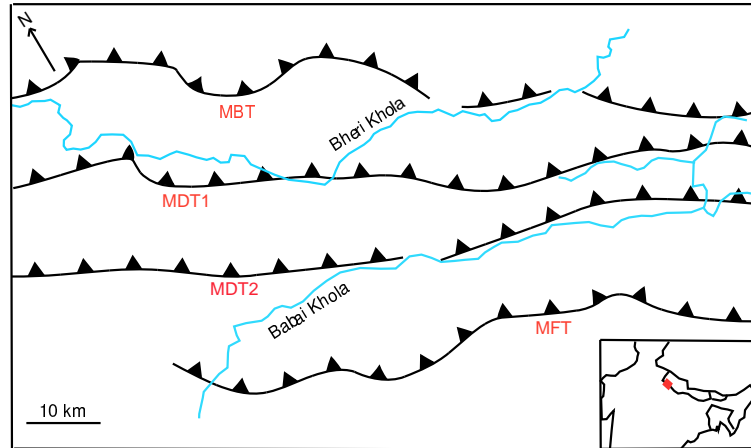


Fig. 7.5 – Carte schématique du Front Himalayen au Népal occidental. D'après [Chaloron *et al.*, 1995]

Les caractéristiques du système chevauchant varient d'Est en Ouest. On observe en effet que ce système est très large au Népal occidental (environ 40 kilomètres) avec quatre chevauchements identifiés (Figure 7.5). Dans le Parc du Chitwan, on observe de plus une crête frontale interprétée comme l'expression en surface d'un pli de propagation situé 5 kilomètres au Sud du MFT [Leturmy, 1997]. Au Népal oriental (Figure 7.6), le système est moins large (25-30 kilomètres) et comprend trois chevauchements. Au Bhoutan (Figure 7.7), il n'y a plus que deux chevauchements, et le système est très mince (maximum 10 kilomètres).

Les pentes topographiques moyennes calculées (à partir des données GTopo30) sur une bande de 20 kilomètres de large à travers le prisme d'avant-pays sont de environ $1,9^\circ$ au Népal occidental, $1,65^\circ$ au Népal oriental et environ $2,5^\circ$ au Bhoutan. Cette dernière valeur est à prendre avec précautions en raison de la faible largeur du prisme au Bhoutan. Le pendage de la surface de décollement dans ces trois régions est assez mal contraint. Des estimations ont été effectuées dans différentes régions sur la base de modèles flexuraux [Lyon-Caen et Molnar, 1985], d'équilibrage de coupes et profils sismiques [Mugnier *et al.*, 1999c; Lavé et Avouac, 2000] et de modélisation de données géodésiques [Jackson et Bilham, 1994; Larson *et al.*, 1999]. Ces données suggèrent que le pendage est de l'ordre de $1,5 - 3^\circ$ dans la partie Est du Népal et plus élevé (entre $4,5^\circ$ et 8°) dans la partie Ouest.

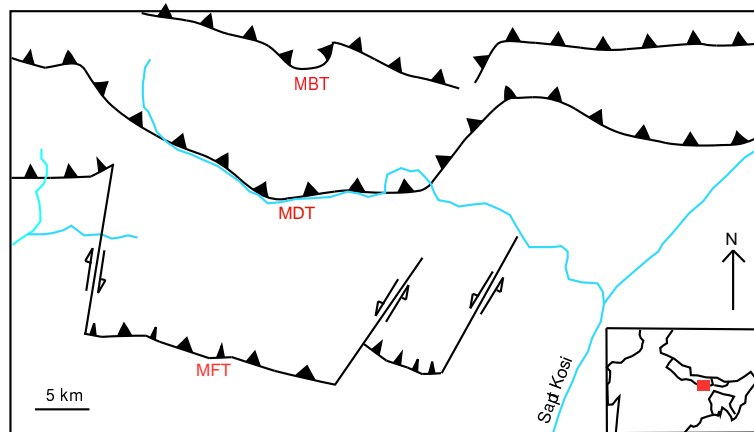


Fig. 7.6 – Carte schématique du Front Himalayen au Népal oriental. D'après [Chalaron *et al.*, 1995]

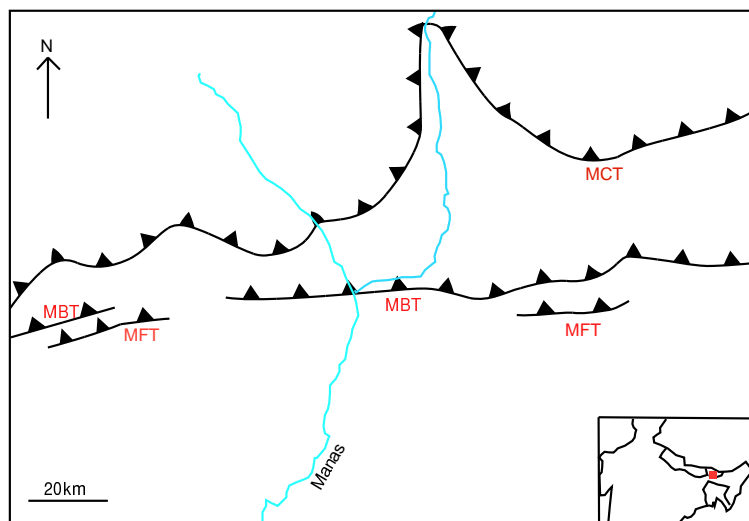


Fig. 7.7 – Carte schématique du Front Himalayen au Bhutan. D'après [Chalaron *et al.*, 1995], tiré de [Gansser, 1983].

7.3 But de l'étude

Cette partie s'intéresse aux systèmes chevauchants et en particulier aux paramètres contrôlant leur propagation frontale. Les objectifs de cette étude sont pour une part de mieux comprendre l'évolution des systèmes chevauchants, et d'autre part de comprendre les raisons des variations latérales observées au Front Himalayen.

Des études antérieures [Chapple, 1978; Davis et Lillie, 1994; Gutscher *et al.*, 1998; Cotton et Koyi, 2000] ont montré que la propagation vers l'avant d'un prisme dépendait fortement de la rhéologie du niveau de décollement, comme on peut l'attendre d'après l'équation donnant la pente topographique d'après la théorie du prisme de Coulomb dans le cas d'un faible frottement basal [Dahlen *et al.*, 1984] :

$$\alpha + \beta = (\mu_b + \beta)(1 + 2\mu^2 - 2\mu\sqrt{1 + \mu^2}) \quad (7.1)$$

où α est la pente topographique, β le pendage de la surface de décollement, μ le coefficient de frottement interne du matériel et μ_b le coefficient de frottement à la base. Pour un angle de décollement constant, la pente topographique augmente avec le coefficient de frottement à la base. Dans les cas où le niveau de décollement est semblable au matériel constitutif du prisme, la pente topographique de ce dernier est forte [Davis et Lillie, 1994; Gutscher *et al.*, 1998]. Dans le cas où le décollement est constitué d'une couche de sel ou d'évaporites, le couplage entre le prisme et son substrat est faible : la topographie observée est plate et le prisme étalé [Davis et Lillie, 1994; Gutscher *et al.*, 1998].

La comparaison des profils entre l'instant initial et l'instant où le prisme est à l'équilibre indique qu'en première approximation, si l'érosion est négligeable, le temps nécessaire pour amener le prisme à l'équilibre est corrélé à sa pente topographique (Figure 7.8).

Un second paramètre susceptible d'influencer la propagation frontale d'un prisme est l'érosion. L'influence du couple érosion / sédimentation sur la dynamique de propagation d'un système chevauchant est complexe. En effet, la redistribution de matière à la surface entraîne un changement de l'état de contraintes du prisme, et modifie donc son évolution [Xiao *et al.*, 1991]. Réciproquement, la topographie due à la formation du prisme détermine la localisation et l'intensité de l'érosion.

La description analytique des prismes peut être impossible à dériver dans des cas complexes. La modélisation numérique est donc un outil essentiel pour ce type d'études.

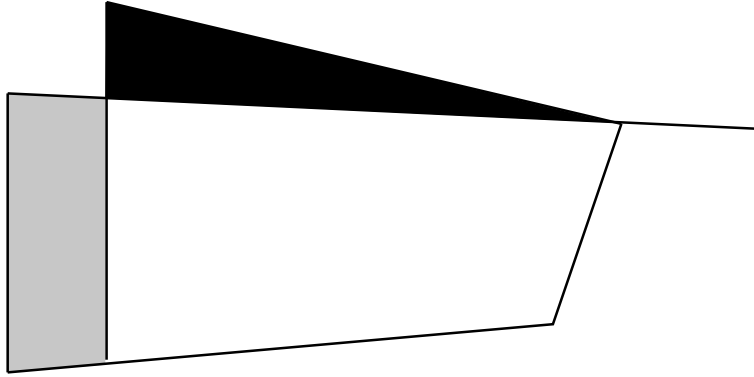


Fig. 7.8 – Coupe schématique du prisme. La partie grisée + blanche représente le prisme au début de la modélisation. La partie noire + blanche représente le prisme à la fin de la modélisation. Le matériel n'ayant pas quitté le système, on en déduit que la partie grisée est égale à la partie noire, donc que le temps nécessaire pour amener le prisme à l'équilibre est proportionnel à la pente topographique d'équilibre

Dans les dix dernières années, plusieurs modèles ont été développés afin d'étudier la propagation des prismes [Chalargon *et al.*, 1995; Hardy *et al.*, 1998]. Dans ces modèles, l'érosion se limitait à la diffusion linéaire. Cependant, bien que le transport à petite échelle puisse effectivement en première approximation être exprimé par une loi de ce type [Flemings et Jordan, 1989; Beaumont *et al.*, 1999], le transport à grande échelle dû aux processus fluviaux n'est pas convenablement modélisé par celle-ci (rappel Chapitre 2). La redistribution de matériel dû à ce processus est certainement très importante, et il ne peut probablement pas être négligé dans une étude portant sur la propagation des prismes.

Le but de cette étude est de réaliser un modèle numérique permettant d'étudier la propagation frontale d'un prisme de manière générale, et dans le contexte Himalayen en particulier.

Après une description des composantes érosives et tectoniques du modèle développé, j'étudierai l'influence de la rhéologie du matériel et du niveau de décollement sur la propagation du prisme. Puis je m'intéresserai à l'influence de l'érosion (et des différents processus de surface) sur cette évolution.

Enfin, je verrai si les variations latérales observées au niveau du système frontal Himalayen peuvent être expliquées, et quels sont les paramètres à l'origine de ces variations.

Chapitre 8

Modèle numérique

Le modèle numérique utilisé ici couple la croissance tectonique d'un prisme à l'érosion et la sédimentation dues à différents processus de surface : érosion diffusive et glissements de terrains sur les versants et incision et transport par les rivières. La diffusion et les glissements de terrains agissent à courte échelle tandis que les rivières peuvent évacuer le matériel vers l'aval à beaucoup plus grande échelle.

8.1 Modèle tectonique

J'utilise dans cette partie un modèle cinématique dérivant directement du modèle pour les plis de rampe décrit dans la première partie et dérivé par [Suppe, 1983]. Ma démarche a été, en partant du modèle développé pour un pli (de propagation ou de rampe - voir Partie I), d'augmenter le nombre de chevauchements afin d'étudier l'ensemble d'un système chevauchant. Afin d'introduire une rétroaction entre les processus tectoniques et érosifs, j'ai introduit un modèle de moindre effort permettant de connaître le chevauchement actif à chaque pas de temps.

Des modèles dynamiques par éléments finis ont été développés afin d'étudier l'évolution des systèmes chevauchants [Erickson et Jamison, 1995] : ils sont souvent plus proches de la réalité mais aussi plus complexes. J'ai choisi de privilégier la simplicité et donc d'utiliser un modèle cinématique.

8.1.1 Géométrie du système

La géométrie du système consiste en un décollement basal de pendage faible ($\approx 5^\circ$), sur lequel se branchent plusieurs chevauchements plus raides. La pente de ces chevauchements internes est d'environ 30° [Jaeger et Cook, 1979; Mandl et Shippam,

1981; Nieuwland *et al.*, 2000]).

En effet, connaissant les contraintes principales sur une faille et donc les composantes normales et tangentielles du tenseur des contraintes, la loi d'Amonton permet de dériver une relation entre la contrainte tectonique $\Delta\sigma_{xx}$ et l'angle de la faille θ_0 . A la suite d'Anderson, j'ai supposé que la géométrie correcte de la faille est celle qui requiert la valeur minimale de $\Delta\sigma_{xx}$. Le pendage des chevauchements en supposant la contrainte σ_{xx} horizontale lors de l'initiation du chevauchement est donc donné par :

$$\tan 2\theta_0 = \pm(1 + \mu) \quad (8.1)$$

Pour une valeur $\mu = 0,55$ (de l'ordre des valeurs utilisées), l'équation 8.1 donne un angle de $30,6^\circ$.

L'hypothèse que les contraintes principales sont verticale et horizontale peut être testée dans le cadre du prisme de Coulomb : dans cette approche, il est possible de calculer ψ_b l'angle entre la base du prisme et σ_1 [Dahlen, 1984] :

$$\psi_b = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{\sin \phi_b}{\sin \phi} \right) - \frac{1}{2} \phi_b \quad (8.2)$$

où $\mu = \tan \phi$ est le coefficient de frottement interne du prisme et $\mu_b = \tan \phi_b$ est le coefficient de frottement basal du prisme. En utilisant les valeurs $\mu = 0,5$ et $\mu_b = 0,3$, on trouve que $\psi_b = 16^\circ$. Comme le pendage du décollement à la base de mes modèles est souvent de l'ordre de 5° , l'angle que forme σ_1 avec l'horizontale (égal à l'angle que forme σ_3 avec la verticale) est d'environ 11° . L'approximation faite en supposant que ces contraintes sont horizontale et verticale n'est donc pas très bonne. Toutefois, elle permet de simplifier fortement le problème, et sera donc faite par la suite.

8.1.2 Détermination du chevauchement actif

Afin de déterminer à chaque pas de temps quel chevauchement va accommoder le raccourcissement, le travail total dû à ce déplacement sur chaque chevauchement est calculé. Ce travail est la somme [Elliott, 1976; Mitra et Boyer, 1986] de (1) le travail de la pesanteur dû au déplacement vertical de matière au dessus de la rampe, (2) le travail de la force de frottement dû au déplacement lui-même sur la faille et (3) le travail de

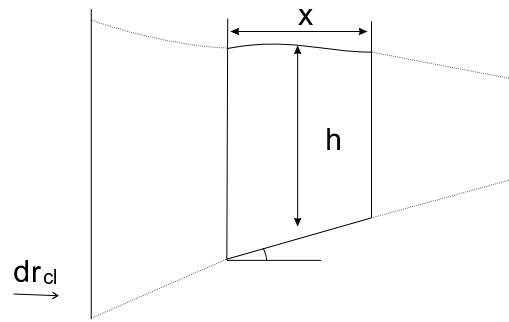


Fig. 8.1 – Géométrie d'une rampe. Chaque rampe est discrétisée en segments de longueur Δx et de pente locale θ . L'épaisseur du matériel au-dessus de la rampe est Δh , et le taux de raccourcissement à l'arrière est V_t .

déformation interne dû à la déformation des écaïlles au dessus de la rampe :

$$W_{tot} = W_g + W_f + W_i \quad (8.3)$$

Dans ce récapitulatif de l'énergie dépensée lors d'un déplacement, le travail dépensé lors de l'initiation et de la propagation d'une fracture est absent. Dans le modèle développé ici, en effet, j'ai considéré que les chevauchements étaient préexistants. Il n'y a donc pas de travail lié à leur nucléation.

Chaque chevauchement est subdivisé en segments de longueur hectométrique Δx (Figure 8.1). Le travail sur chaque chevauchement est alors calculé comme la somme des travaux sur chacun des segments le composant. On suppose ensuite que le glissement va se produire le long du chevauchement sur lequel ce travail est minimal [Masek et Duncan, 1998; Hardy *et al.*, 1998].

8.1.2.1 Force de pesanteur

Pour un segment donné, le travail de la force de pesanteur W_g est :

$$W_g = - \int_{fault} \mathbf{W} \cdot d\mathbf{r} \quad (8.4)$$

où \mathbf{W} est la force de pesanteur et $d\mathbf{r}$ le déplacement sur la faille. Comme la force de pesanteur est verticale, on peut projeter ces vecteurs sur un axe vertical :

$$\mathbf{W}|_z = -\rho g \Delta h \Delta x \quad (8.5)$$

$$d\mathbf{r}|_z = V_t \tan \theta \quad (8.6)$$

où ρ est la densité du matériau, g l'accélération de la pesanteur, Δh la hauteur de matériau au dessus de la faille pour le segment, Δx la longueur horizontale de ce segment, V_t le déplacement imposé sur ce segment et θ la pente de ce segment (Figure 8.1).

L'expression du travail de la force de pesanteur en fonction des paramètres du modèle est donc :

$$W_g = \rho g \Delta h \Delta x V_t \tan \theta \quad (8.7)$$

8.1.2.2 Force de frottement

Le travail de la force de frottement est donné par [Masek et Duncan, 1998] :

$$W_f = \tau \frac{V_t \Delta x}{\cos^2 \theta} \quad (8.8)$$

où τ est la contrainte cisailante sur la surface de la faille, calculée par le critère de Coulomb :

$$\tau = \mu^* \sigma_n \quad (8.9)$$

où μ^* est le coefficient de frottement effectif ($\mu^* = \mu[1 - \lambda]$ avec μ le coefficient de frottement et λ la pression interstitielle) et σ_n la contrainte normale calculée en faisant l'hypothèse que les contraintes principales sont verticale (σ_3 est lithostatique) et horizontale ($\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta\sigma_{xx}$) [Hardy *et al.*, 1998; Masek et Duncan, 1998]. Dans cette approche, $\Delta\sigma_{xx}$ est la contrainte tectonique entraînant la déformation compressive.

Lors du calcul de la force de frottement, le coefficient de frottement utilisé sera tantôt μ_b lorsqu'on se trouve au niveau du décollement basal, tantôt μ lorsqu'on se trouve au niveau d'un chevauchement interne au prisme.

8.1.2.3 Déformation interne

La déformation interne peut être approximée par les variations d'angle le long des chevauchements. En effet, pour un chevauchement linéaire, le bloc supérieur est rigide, et la déformation interne est nulle. Plus le chevauchement est déformé et plus la

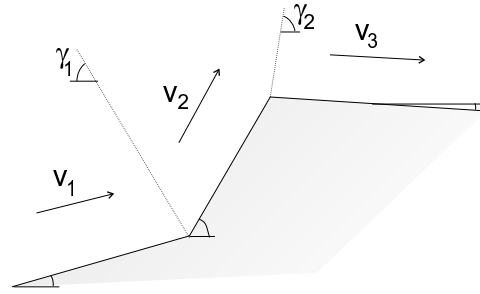


Fig. 8.2 – Géométrie du pli de rampe. Les paramètres initiaux sont le pendage du décollement ϕ , le pendage de la rampe θ_0 et la pente topographique α . Les angles des surfaces axiales γ_1 et γ_2 sont calculés en fonction des paramètres initiaux. Les vitesses sont alors fonction de la vitesse de raccourcissement et de ces angles γ_1 et γ_2

déformation dans son toit nécessaire au glissement est importante :

$$W_i = K \int_{fault} \delta\theta_{i+1} - \delta\theta_i = K \Sigma(\delta\theta_{i+1} - \delta\theta_i) \quad (8.10)$$

où $\delta\theta_i$ est la pente de la rampe à la position i et K est un coefficient de dimension.

D'après les estimations d'énergies dépensées lors de la formation d'un duplex, [Mitra et Boyer, 1986] calculent que les travaux les plus importants sont le travail de la force de gravité, puis le travail de déformation interne (deux à trois fois plus faible), et enfin le travail de la force de frottement et l'énergie de nucléation (du même ordre de grandeur, et d'un ordre de magnitude inférieur au travail gravitaire). Le coefficient K est ajusté de manière à obtenir des proportions des différents travaux similaires à ceux calculés dans l'étude de [Mitra et Boyer, 1986].

L'étude de [Hardy *et al.*, 1998] ne tenait pas compte de ce travail de déformation interne. Or l'étude de [Mitra et Boyer, 1986] montre qu'il est le deuxième travail le plus important, et peut donc difficilement être négligé.

8.1.3 Détermination du chevauchement actif

Le chevauchement sur lequel le travail résultant du déplacement est minimal est choisi par le modèle comme le chevauchement sur lequel se produit le glissement. Afin de ne pas surcharger le modèle, j'ai décidé de choisir la meilleure géométrie en faille-rampe-faille correspondant au chevauchement sur lequel se produit le glissement (dont la géométrie peut être plus complexe à la suite par exemple de glissements antérieurs). Cette simplification permet toutefois de faire varier le pendage de la rampe au cours du temps. Il est alors possible de délimiter des régions de vitesse constante, séparées

par des surfaces axiales, dont la pente peut être calculée en fonction de la géométrie du chevauchement (Figure 8.2 - voir Partie I). La partie du modèle située à l'arrière de ce chevauchement (topographie et chevauchements) est alors déplacée en utilisant les résultats de [Suppe, 1983] concernant la cinématique des plis de rampe.

8.2 Modèle d'érosion

Le modèle tectonique détaillé ci-dessus est couplé à un modèle d'érosion en plan, afin de pouvoir étudier précisément l'influence des divers processus érosifs. Par la suite, on considérera donc un modèle tectonique cylindrique.

L'érosion de la partie superficielle du modèle agit comme combinaison de plusieurs processus de surface :

- la diffusion sur les versants,
- les glissements de terrain,
- l'incision fluviale.

Ces processus ont été détaillés dans la Partie I. Comme dans cette première partie, seuls les glissements de terrain et l'incision fluviale ont été utilisés effectivement.

8.3 Espacement des chevauchements

Dans mes modèles, la géométrie des chevauchements ainsi que leur espacement sont imposés au début du programme. Ces paramètres imposés sont en réalité dans la nature déterminés par le système.

Afin de représenter au mieux l'espacement des chevauchements dans mes modèles, j'ai réalisé des essais avec un grand nombre de chevauchements, afin de laisser choisir le système parmi ceux-ci : dans ce cas, on peut dire que la configuration retenue est la configuration optimale.

Le modèle initial est représenté Figure 8.3. Il comporte 500 chevauchements sur une distance de 42km, ce qui fait plus d'une rampe tous les 100m. J'ai réalisé plusieurs modélisations en variant les coefficients de frottement interne et basal ainsi que la pente du décollement.

Les résultats montrent que :

- L'espacement des chevauchements augmente peu avec le coefficient de frottement interne (Figure 8.4).

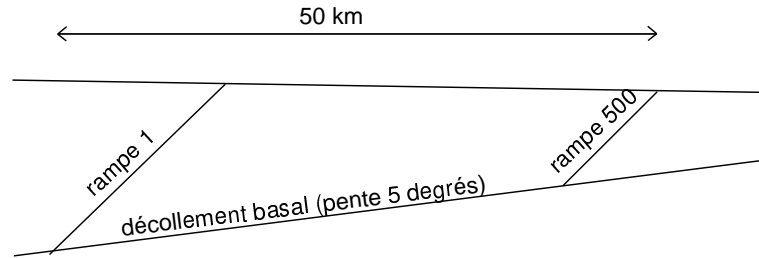


Fig. 8.3 – Géométrie initiale du modèle pour déterminer l’espacement optimal des chevauchements

- L’espacement des chevauchements diminue lorsque le coefficient de frottement basal augmente (Figure 8.5). Ce résultat est en accord avec les résultats de modélisations analogiques de [Koyi et Vendeville, 2003], et avec les observations de terrain que l’on peut faire au front Himalayen. Au Pakistan en effet, dans la Salt Range, le niveau de décollement est constitué par une couche de sel (le coefficient de frottement basal est donc faible). Or on observe que sur toute la zone de localisation de cette couche de sel, il n’y a pas de chevauchement, mais que l’unique structure accommodant le raccourcissement se trouve très en avant de cette zone [Cotton et Koyi, 2000].
- L’espacement des chevauchements augmente peu avec la pente du décollement basal (Figure 8.5).

On observe dans toutes les modélisations effectuées précédemment que les chevauchements activés peuvent être regroupés selon quatre zones majeures (Figure 8.4). Cependant, parmi ces zones de cisaillement, plusieurs chevauchements très proches sont activés. Dans les modélisations, les chevauchements sont considérés comme préexistants, et il n’y a de ce fait pas de perte d’énergie due à la création d’un nouveau chevauchement. Comme les différences de travail entre deux chevauchements voisins sont très faibles, on peut supposer que s’il était nécessaire de dépenser de l’énergie pour créer un chevauchement jusqu’alors inactif, le premier chevauchement activé dans chaque zone concentrerait l’ensemble du déplacement de cette zone.

On peut toutefois remarquer que, même sans cette énergie de formation, tous les chevauchements ne sont pas activés, mais qu’il existe un espacement optimal lié à la rhéologie du prisme.

Les modélisations réalisées précédemment ayant toutes distingué quatre écailles dans les cinquante kilomètres impliqués dans le système chevauchant, je vais dans ce qui

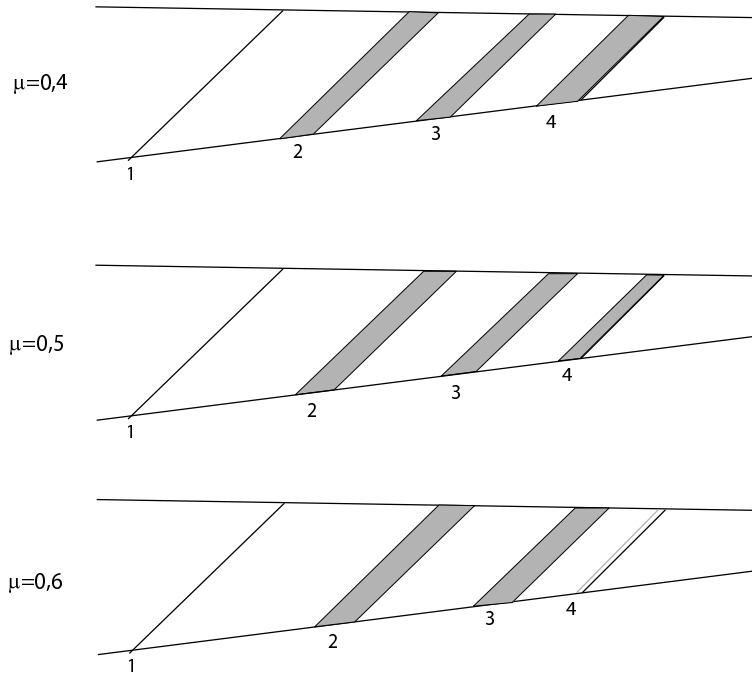


Fig. 8.4 – Espacement optimal des chevauchements pour différentes valeurs du coefficient de frottement interne. Les bandes grisées indiquent des zones de cisaillement regroupant plusieurs chevauchements activés. Voir le Fig. 8.3 pour l'échelle.

suit considérer quatre chevauchements, espacés de la valeur moyenne observée sur les modélisations précédentes.

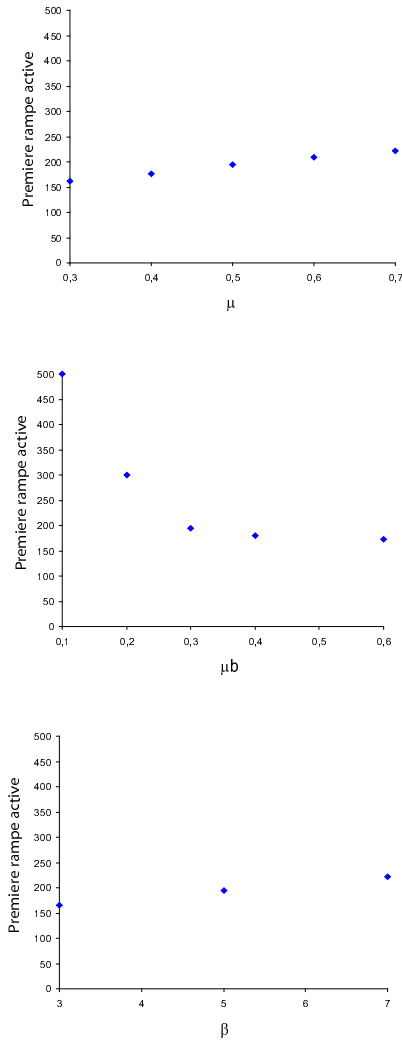


Fig. 8.5 – Numéro du premier chevauchement activé (proportionnel à l'espace moyen des chevauchements) en fonction du coefficient de frottement interne (μ), du coefficient de frottement basal (μ_b), et du pendage de la surface de décollement (β)

Chapitre 9

Résultats des modélisations

Dans ce chapitre, je m'intéresse à l'évolution des systèmes chevauchants, et à l'influence des paramètres d'entrée du système sur cette évolution. Les valeurs des différents paramètres du modèle sont donnés en Table 9.

9.1 Evolution d'un système chevauchant

Dans un premier temps, afin de caractériser l'évolution générale temporelle d'un système chevauchant, j'ai réalisé une modélisation préliminaire. Celle-ci comporte uniquement de l'érosion diffusive.

La figure 9.1, qui montre le chevauchement sur lequel glisse le prisme à chaque incrément de temps, permet de visualiser la propagation de la déformation. On observe que le prisme s'épaissit de l'arrière vers l'avant, avec une déformation située d'abord au niveau des chevauchements internes, et se propageant vers les chevauchements externes. Le glissement se produit sur le chevauchement le plus externe lorsque 310 000 ans se sont écoulés. Toutefois, cette propagation n'est pas simple : plusieurs chevauchements peuvent être actifs durant la même période, et il peut y avoir des chevauchements hors séquence, comme l'ont montré [Hardy *et al.*, 1998], et comme on l'observe dans la nature, dans les Siwaliks occidentales par exemple [Mugnier *et al.*, 1999b].

La figure 9.2 montre la géométrie du prisme à la fin de la modélisation, c'est-à-dire lorsque le glissement se produit sur le chevauchement le plus externe. La topographie observée est celle d'un prisme avec un angle à la base de 5° (paramètre d'entrée) et une pente topographique constante de $\approx 0,5^\circ$. Lors de son évolution, le prisme se déforme de manière à ajuster sa pente de surface à une valeur d'équilibre. On observe effectivement (Figure 9.3) que le prisme ajuste tout d'abord sa pente de surface au-dessus du premier chevauchement. Lorsque la pente topographique est égale à la

Paramètre	Nom	Valeur	fixe / variable
Longueur totale du modèle		200 km	fixe
Longueur du système chevauchant		60 km	fixe
Largeur du modèle		30 km	fixe
Vitesse de raccourcissement	V_t	2 cm/an	fixe
Pendage de la surface de décollement	ϕ	5 °	variable
Pendage des chevauchements internes		30 °	fixe
Coefficient de frottement interne	μ	0,5	variable
Coefficient de frottement basal	μ_b	0,4	variable
Pression interstitielle	λ	0,7	fixe
Pente critique des glissements de terrain	p_{max}	20 °	variable
Coefficient d'incision fluviale	k_f	10 ⁻³	variable
Taux de précipitations	v	1 m/an	fixe
Vitesse de raccourcissement	V_t	2 cm/an	fixe

TAB. 9.1 – Paramètres utilisés dans le modèle d'évolution d'un système chevauchant

pende d'équilibre, le prisme se propage jusqu'au second chevauchement. Il ajuste alors sa pente jusqu'à ce chevauchement. On remarque que pour cela, il doit forcément y avoir glissement sur le premier chevauchement, afin d'épaissir le prisme au-dessus de celui-ci : les glissements hors séquence trouvent leur origine dans cet épaississement supplémentaire au-dessus du premier chevauchement.

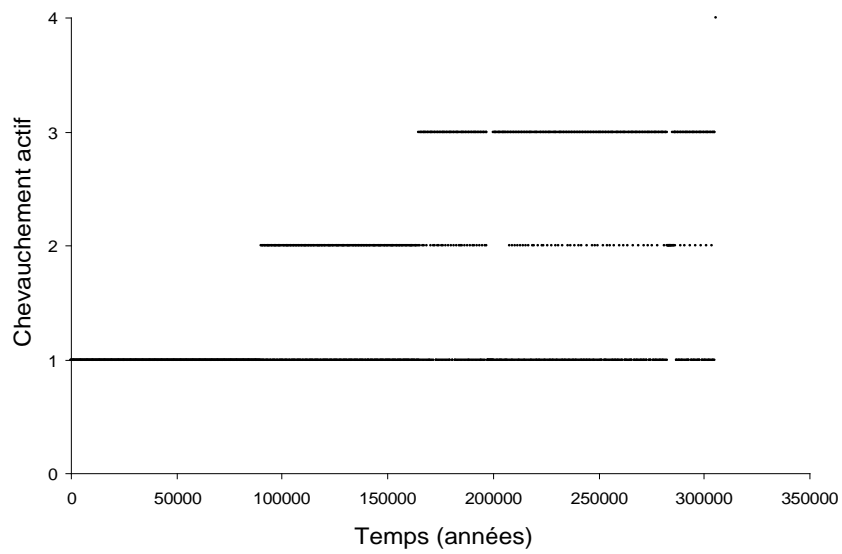


Fig. 9.1 – Rampe active à chaque pas de temps.

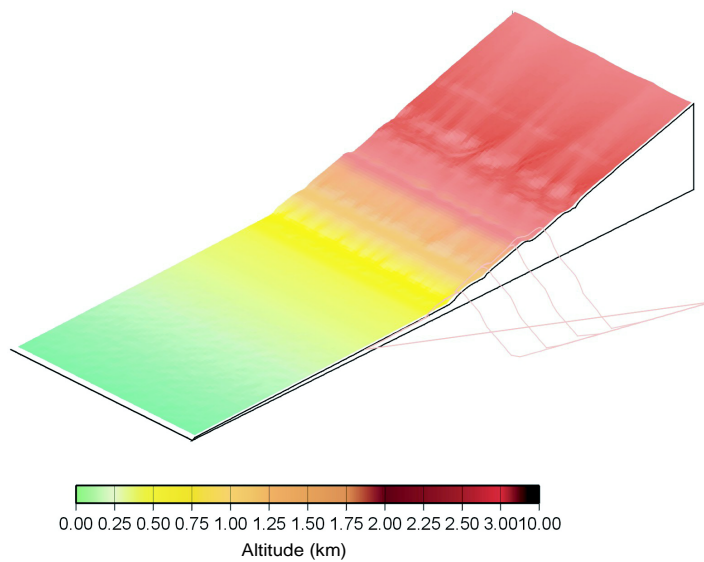


Fig. 9.2 – Topographie du prisme au moment où le glissement se produit sur le chevauchement le plus externe.

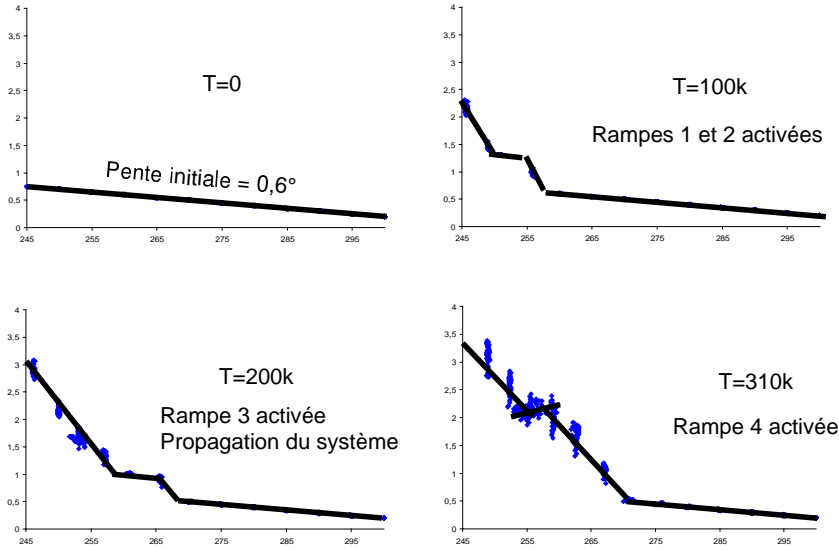


Fig. 9.3 – Topographie du prisme à différents instants de son évolution. On remarque l'évolution vers l'avant de la déformation.

9.2 Influence de la rhéologie sur la propagation frontale d'un prisme

Plusieurs articles [Mulugeta, 1988; Hardy *et al.*, 1998; Gutscher *et al.*, 1998; Schott et Koyi, 2001] ont mis en évidence le rôle que la rhéologie d'un prisme avait sur sa propagation et sa géométrie d'équilibre. Dans ce qui suit, j'ai réalisé plusieurs modélisations en variant de manière systématique les coefficients de frottement basal et interne. Les résultats montrent que :

- pour un frottement à la base constant, la vitesse de propagation vers l'avant est corrélée avec le frottement interne (Figure 9.4). Ce résultat est cohérent avec le fait qu'il est alors plus "facile" pour le prisme de glisser sur le détachement basal que sur un chevauchement interne.
- pour un frottement interne constant, la vitesse de propagation vers l'avant est inversement corrélée avec le frottement basal (Figure 9.4). De nouveau, ce résultat est intuitif : un faible frottement basal exprime un faible couplage à la base, et il devient alors plus facile de glisser sur la base du prisme que de l'épaissir.

Comme évoqué plus haut, la vitesse de propagation frontale est inversement corrélée à la pente topographique de la surface du prisme. J'ai donc calculé la pente moyenne du modèle à la fin de chaque modélisation, et en ai extrait la Figure 9.5. On remarque bien que pour un frottement basal constant, la pente topographique diminue lorsque

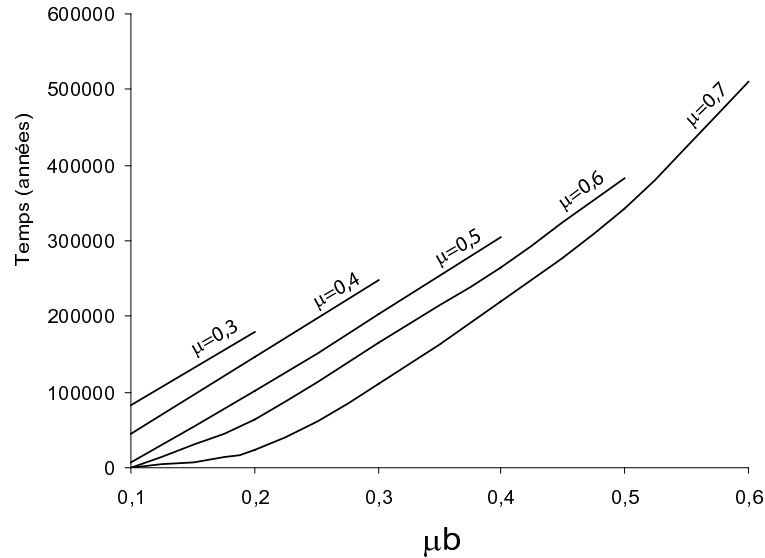


Fig. 9.4 – Temps écoulé avant que le glissement ne se produise sur le chevauchement le plus externe, en fonction du frottement à la base et pour différents frottements internes

le frottement interne augmente. D'autre part, pour un frottement interne constant, la pente du système augmente lorsque le frottement basal augmente. Ces caractéristiques sont en accord avec les remarques concernant la vitesse de propagation frontale, ainsi qu'avec les observations de terrain.

Afin d'étudier les critères d'apparition des chevauchements hors séquence, j'ai décidé d'introduire le paramètre P caractérisant la proportion de ces glissements hors séquence par rapport au chevauchement le plus externe activé : P est compris entre 0 et 1. $P = 0$ s'il n'y a pas de chevauchement hors séquence, et P tend vers 1 si tous les glissements se font hors séquence.

On observe que :

- Il n'y a pas de dépendance nette de P avec le coefficient de frottement à la base pour un frottement interne constant (Figure 9.6).
- Les chevauchements hors séquence sont plus nombreux lorsque le frottement interne diminue (Figure 9.6).

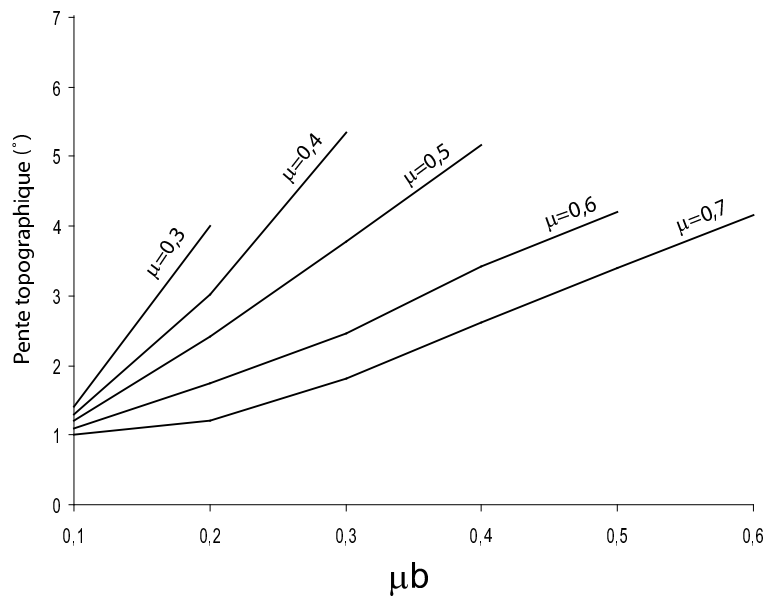


Fig. 9.5 – Pente topographique du prisme à la fin de la modélisation, en fonction du frottement à la base et pour différents frottements internes

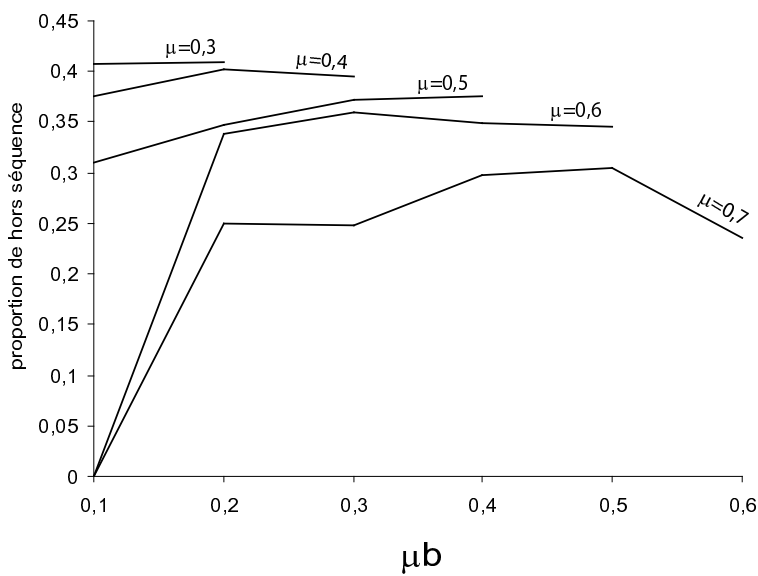


Fig. 9.6 – Proportion de chevauchements hors séquence en fonction du frottement à la base

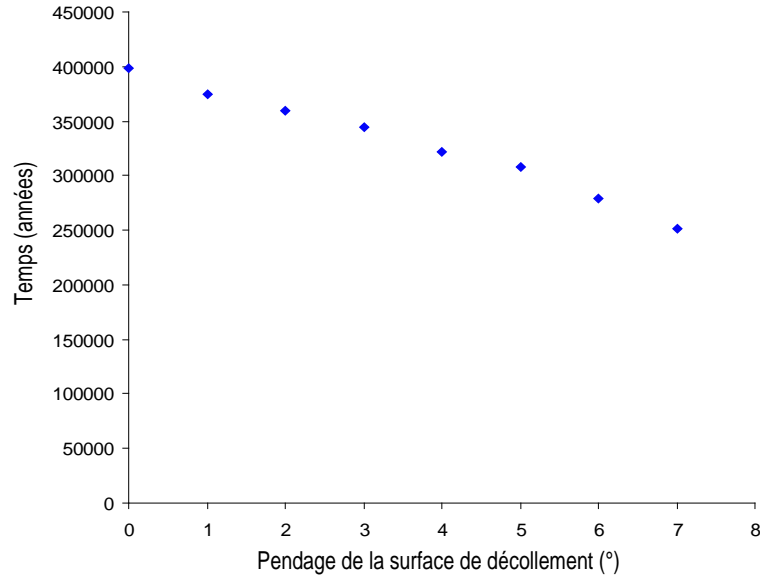


Fig. 9.7 – Temps nécessaire à la propagation de la déformation jusqu'au chevauchement le plus externe en fonction du pendage de la surface de décollement, tous les autres paramètres étant ceux de la Table 9.1

9.3 Influence de la géométrie sur la propagation frontale d'un prisme

Afin de caractériser au mieux les paramètres contrôlant la propagation frontale d'un prisme, j'ai décidé d'étudier l'influence du pendage de la surface de décollement sur celle-ci. J'ai donc réalisé des modélisations en variant systématiquement ce paramètre entre 0° et 8° (valeurs limites données par [Bilham *et al.*, 1997] pour l'Himalaya). Les résultats montrent que lorsque le pendage de la surface de décollement augmente, le temps nécessaire à la propagation jusqu'au chevauchement le plus externe diminue (Figure 9.7).

9.4 Influence des processus érosifs sur la propagation frontale d'un prisme

9.4.1 Influence des différents processus de surface

Afin d'étudier l'influence de chaque processus érosif sur la propagation du prisme, je suis partie d'une modélisation réalisée sans érosion et y ai successivement incorporé les différents processus.

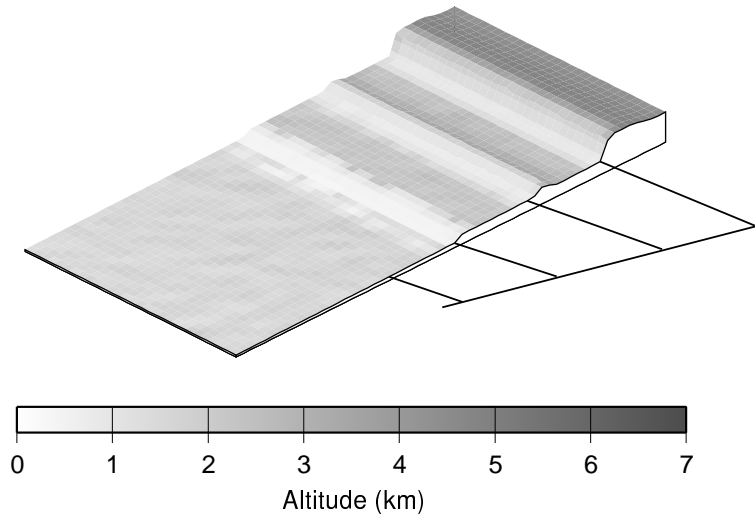


Fig. 9.8 – Topographie finale du système chevauchant dans un modèle sans érosion

La modélisation de départ est celle pour laquelle $\mu = 0,5$, $\mu_b = 0,4$ et $\beta = 5^\circ$. Dans un contexte sans érosion, la topographie du prisme à la fin du modèle (Figure 9.8) n'est évidemment pas réaliste. On reconnaît la géométrie caractéristique des plis de rampe, non modifiée par l'érosion. La séquence d'activation des chevauchements est représentée Figure 9.9 : il y a un taux de chevauchements hors séquence de 37,5 %. Le temps nécessaire à la propagation jusqu'au chevauchement externe est 305 400 ans. La pente moyenne de la surface du prisme à la fin de la modélisation est de $5,9^\circ$.

9.4.1.1 Glissements de terrains

Le deuxième modèle comporte uniquement des glissements de terrain, avec une pente critique de 20° . La topographie finale (Figure 9.10) est beaucoup plus lissée que dans le modèle précédent. Les structures créées au niveau de chaque chevauchement sont érodées et la matière ainsi enlevée est déposée au bas des pentes. La propagation du prisme (Figure 9.11) se fait de l'arrière-pays vers l'avant-pays, avec de nombreux glissements hors-séquence. La proportion de glissements hors séquence est beaucoup plus importante que dans le cas sans érosion, puisqu'elle vaut 69 %.

La dynamique de propagation frontale du prisme est similaire à celle qui est observée dans un contexte sans érosion, mais le taux de propagation est beaucoup plus faible : plus de 750 000 ans sont nécessaires à la propagation jusqu'au chevauchement le plus externe.

La pente d'équilibre est de $5,4^\circ$.

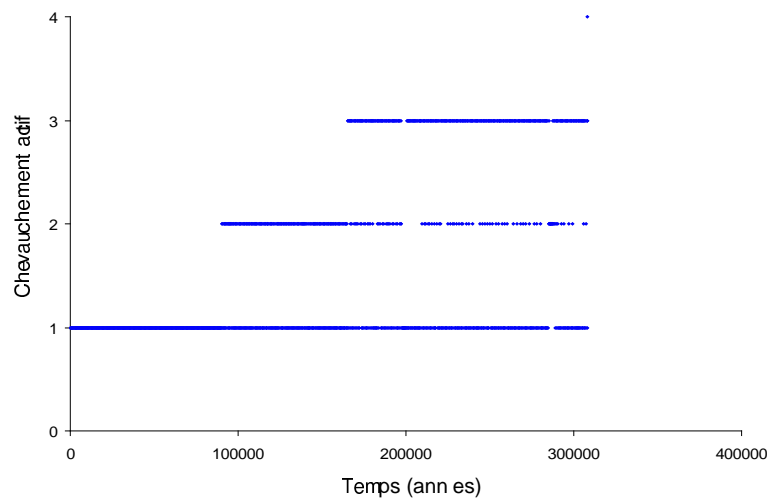


Fig. 9.9 – Séquence d’activation des chevauchements dans un modèle sans érosion

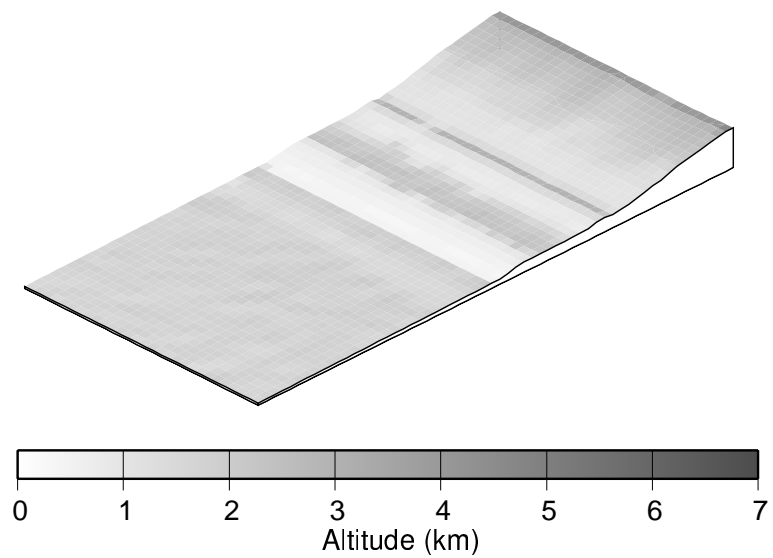


Fig. 9.10 – Topographie finale du système chevauchant dans un modèle avec uniquement des glissements de terrains

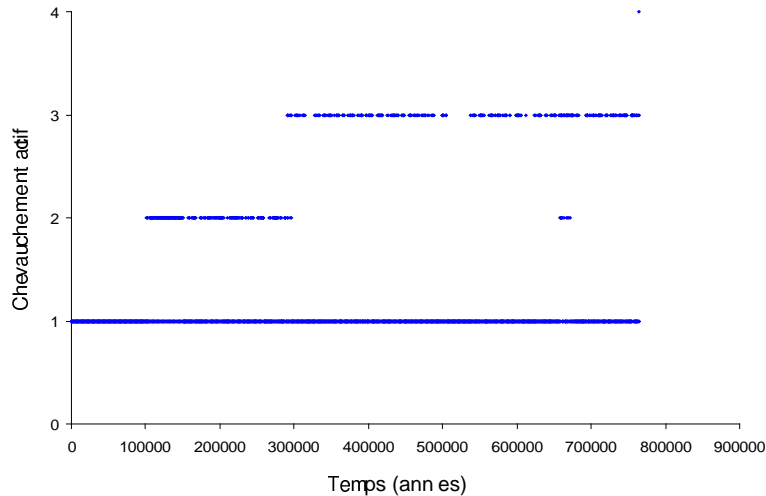


Fig. 9.11 – Séquence d’activation des chevauchements dans un modèle avec uniquement des glissements de terrains. $P = 69 \%$

9.4.1.2 Incision fluviale

Dans le modèle précédent, les processus érosifs étaient des processus agissant à petite échelle spatiale. L’érosion fluviale, en revanche, permet un transport de matière à grande échelle. Elle devrait donc avoir une influence beaucoup plus importante sur la dynamique des prismes.

Le modèle suivant comporte de l’incision fluviale et des glissements de terrain. Dans ce modèle, la géométrie finale du prisme est similaire à ce que l’on observait dans l’essai précédent. Toutefois, les structures sont recoupées par des rivières, et leur hauteur maximale est plus élevée (Figure 9.12). Ceci est dû au fait que la charge prise en compte lors des calculs de travaux est celle d’une section latérale entière : les altitudes plus élevées compensent les vallées fluviales en creux (Figure 9.13). La pente d’équilibre est de $5,7^\circ$, ce qui est comparable aux pentes obtenues dans les cas précédents.

Le temps nécessaire pour propager le prisme jusqu’au chevauchement le plus externe est plus grand que dans les essais précédents : plus de 800 000 ans. On peut expliquer ceci par le fait que les rivières évacuent du matériel de l’arrière vers l’avant du prisme, et allègent donc la partie la plus interne.

Enfin, dans ce modèle, la proportion de glissements hors-séquence est très légèrement supérieure au cas avec uniquement des glissements de terrains : $P = 70 \%$.

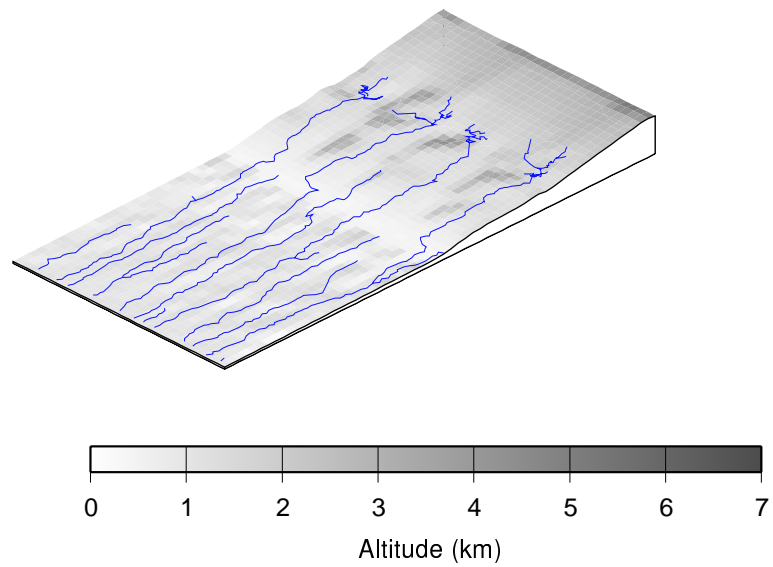


Fig. 9.12 – Topographie finale du système chevauchant dans un modèle avec glissements de terrains et érosion fluviale

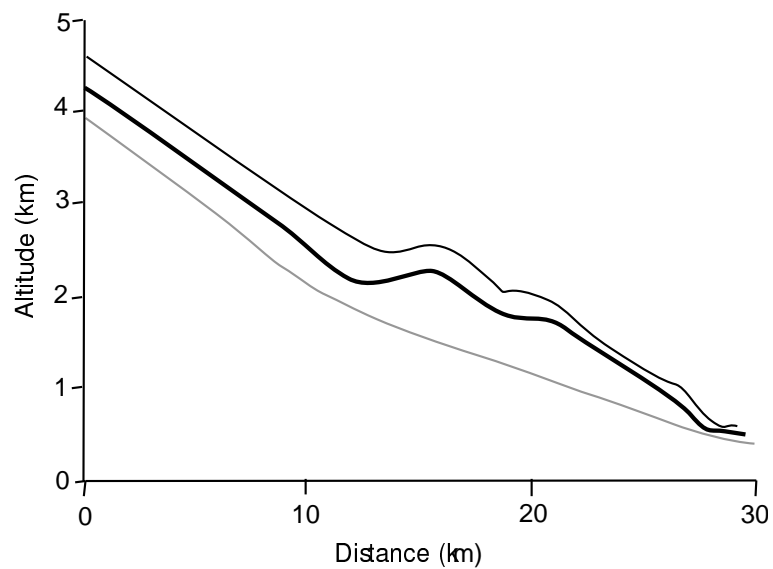


Fig. 9.13 – Profils à travers le prisme : en gris, altitude des rivières ; en noir fin, altitude maximale du prisme ; en noir épais : altitude moyenne du prisme

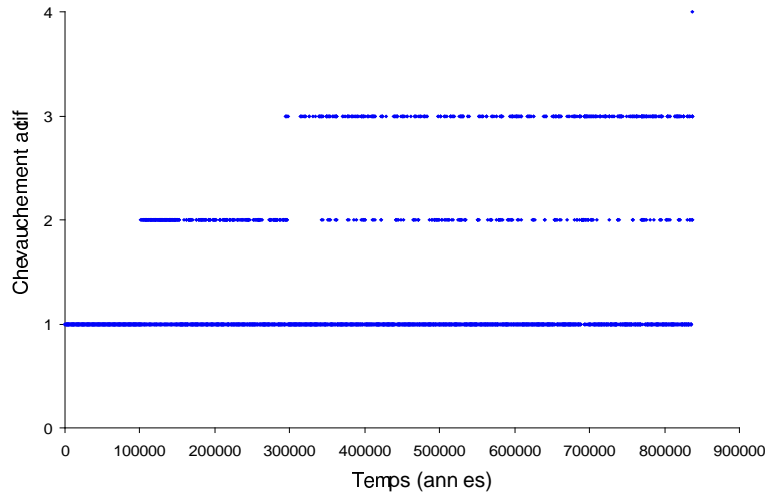


Fig. 9.14 – Séquence d’activation des chevauchements dans un modèle avec glissements de terrains et érosion fluviale. $P = 70 \%$

9.4.2 Influence de la pente critique des glissements de terrain

Afin d’observer la dépendance de la propagation du prisme avec la pente critique des glissements de terrain, j’ai réalisé plusieurs modélisations en faisant systématiquement varier ce paramètre. La constante d’incision fluviale a été prise constante et égale à 10^{-3} . Dans toutes les modélisations effectuées, des glissements de terrains se sont produits. Les résultats indiquent que (Figure 9.15) :

- Le temps nécessaire à la propagation du prisme jusqu’à la rampe la plus externe augmente lorsque la pente critique des glissements de terrain diminue.
- Pour une valeur seuil de la pente critique (de l’ordre de 18°), le prisme ne se développe jamais jusqu’au point de glisser sur la dernière rampe.
- La pente d’équilibre du prisme est de l’ordre de $5,7^\circ - 6,1^\circ$. Compte-tenu de l’incertitude lors du calcul de cette pente, on peut considérer qu’elle ne dépend pas de la pente critique des glissements de terrains.
- Lorsque la pente critique augmente, la proportion de chevauchements hors séquence diminue.

9.4.3 Influence du coefficient d’incision fluviale

Afin d’observer la dépendance de la propagation du prisme avec la puissance des rivières, j’ai réalisé plusieurs modélisations en faisant systématiquement varier ce paramètre. La pente critique des glissements de terrains a été prise constante et égale à 20° . Les résultats indiquent que (Figure 9.16) :

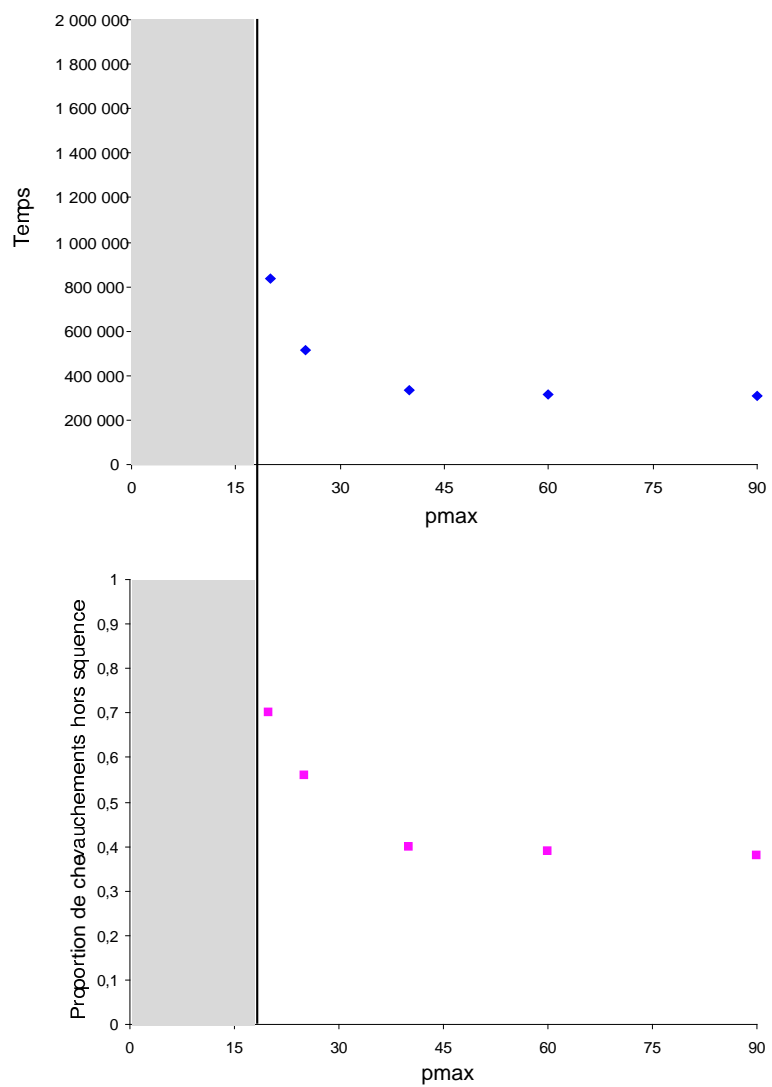


Fig. 9.15 – Temps nécessaire à la propagation du prisme jusqu'à la dernière rampe, et proportion de chevauchements hors-séquence, en fonction de la pente critique des glissements de terrains (pour un coefficient d'incision fluviale de 10^{-3} km/an)

- Le temps nécessaire à la propagation du prisme jusqu'à la rampe la plus externe augmente lorsque $k_f v$ augmente.
- Pour une valeur seuil de $k_f v$ (de l'ordre de $7,5 \cdot 10^{-3}$), le prisme ne se développe jamais jusqu'au point de glisser sur la dernière rampe.
- La pente d'équilibre du prisme est de l'ordre de $5,4^\circ - 5,7^\circ$. Compte-tenu de l'incertitude lors du calcul de cette pente, on peut considérer qu'elle ne dépend pas du coefficient d'incision fluviale.
- Lorsque $k_f v$ augmente, la proportion de chevauchements hors séquence augmente.

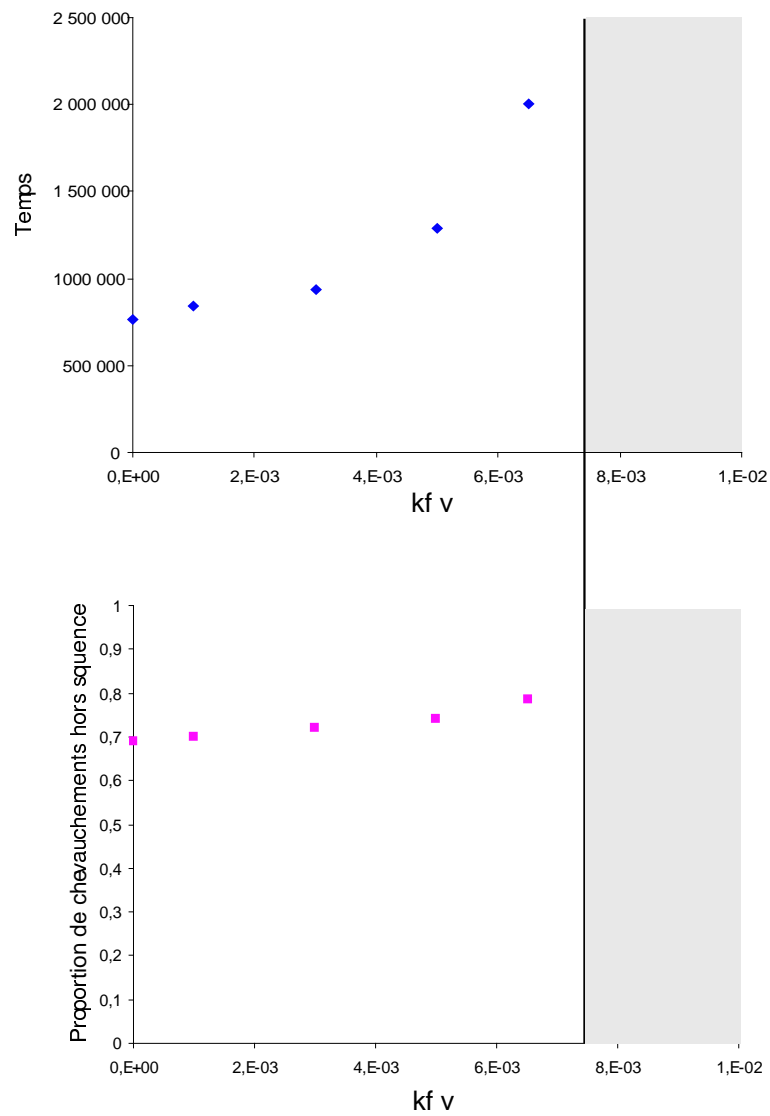


Fig. 9.16 – Temps nécessaire à la propagation du prisme jusqu'à la dernière rampe, et proportion de chevauchements hors-séquence, en fonction de la constante d'incision fluviale (pour une pente critique des glissements de terrains de 20°)

Chapitre 10

Discussion

Les résultats de la partie précédente ont montré que :

- L’espacement des chevauchements dans le prisme dépend de sa rhéologie.
- La géométrie d’équilibre, et donc la vitesse de propagation frontale du prisme dépend de sa rhéologie.
- La vitesse de propagation frontale du prisme dépend des paramètres érosifs, mais la géométrie d’équilibre ne varie pas.

Dans ce chapitre, je vais discuter ces résultats en les comparant à ce que prédisent d’autres types de modèles.

Enfin, je vais comparer ces prédictions aux observations de terrain en Himalaya, afin d’expliquer ces observations.

10.1 Espacement des chevauchements

En considérant une rhéologie élastique pour le matériau composant le prisme, [Mandl et Shippam, 1981] et [Schott et Koyi, 2001] ont dérivé une relation liant l’espacement entre les chevauchements aux caractéristiques géométriques du prisme et à la rhéologie du matériau. La relation qu’ils obtiennent n’est cependant qu’une première approximation permettant de comprendre le mode de propagation des systèmes chevauchants.

La géométrie complexe du prisme est simplifiée afin de pouvoir être caractérisée par des paramètres simples (Figure 10.1).

L’analyse du champ de contraintes [Mandl et Shippam, 1981] donne :

$$\frac{s}{h} = \frac{\sigma_1}{\mu_b \rho g h} + \frac{F(\gamma, \mu, \mu_b)}{2\mu_b} \quad (10.1)$$

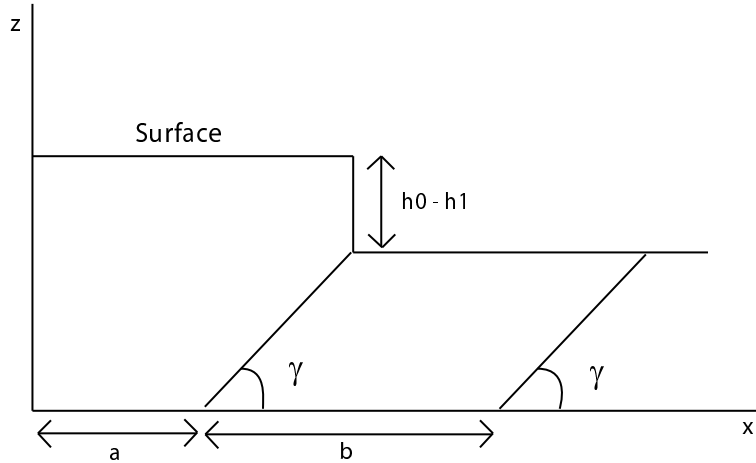


Fig. 10.1 – Géométrie simplifiée du prisme. La partie activée du prisme a une longueur a et une hauteur h_0 , la partie non activée a une hauteur h_1 . Le pendage des chevauchements est de 30° . Le nouveau chevauchement se crée à une distance b du chevauchement précédent. D'après [Schott et Koyi, 2001].

où s vaut a (respectivement b) et h vaut h_0 (respectivement h_1), σ_1 est la contrainte en compression et

$$F(\gamma, \mu, \mu_b) = \frac{\mu_b}{\tan \gamma} + \frac{\frac{1}{2} \sin(2\gamma) + \mu \cos^2 \gamma - \mu_b (\cos(2\gamma) - \mu \sin(2\gamma))}{-\frac{1}{2} \sin(2\gamma) + \mu \sin^2 \gamma} \quad (10.2)$$

Pour que le glissement ait lieu, il faut que la contrainte compressive σ_1 soit suffisamment importante :

$$\frac{\sigma_1}{\rho g} \geq \mu_b s - \frac{hF(\gamma, \mu, \mu_b)}{2} \quad (10.3)$$

En appliquant cette dernière condition au chevauchement actuellement actif (avec $s = a$, $h = h_0$ et $\sigma_1 = \Sigma$), ainsi qu'au nouveau chevauchement (avec $s = b$, $h = h_1$ et $\sigma_1 = \Sigma - \mu_b b \rho g$), on peut calculer l'espacement entre ces deux chevauchements :

$$b = \frac{(h_0 - h_1)F(\gamma, \mu, \mu_b)}{2\mu_b} \quad (10.4)$$

Il est alors possible de déterminer l'évolution de l'espacement prédit par ce modèle en fonction de l'évolution des autres paramètres du système. En utilisant un angle $\gamma = 30^\circ$, on obtient les tendances suivantes (Figure 10.1) :

- Lorsque le frottement à la base du prisme diminue, l'espacement entre les chevauchements augmente.

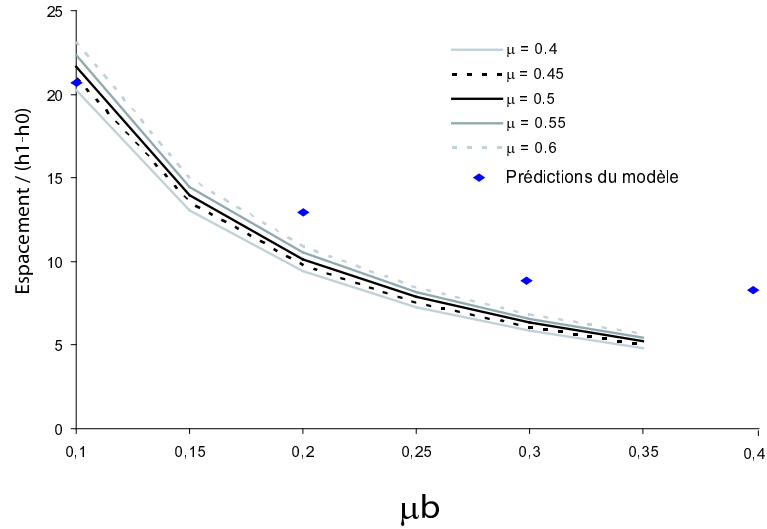


Fig. 10.2 – Espacement des chevauchements prédit par le modèle de [Schott et Koyi, 2001] et comparaison aux prédictions du modèle en fonction du coefficient de frottement à la base du prisme, pour différentes valeurs du coefficient de frottement interne

- Lorsque le frottement interne du prisme augmente, l’espacement entre les chevauchements augmente peu.

Ces deux comportements sont similaires à ceux prédits par le modèle de système chevauchant développé dans cette thèse, même si les deux approches sont différentes (minimisation d’énergie dans notre cas, déformation élastique dans celui de [Mandl et Shippam, 1981]).

10.2 Géométrie d’équilibre du prisme

Dans la théorie du prisme critique [Dahlen *et al.*, 1984], pour de faibles frottements à la base, l’angle du prisme peut être exprimé en fonction des frottements à la base et interne (Equation 7.1). La pente topographique du prisme à l’état critique est alors donnée par :

$$\alpha = (\mu_b + \beta) \left(1 + 2\mu^2 - 2\mu\sqrt{1 + \mu^2} \right) - \beta \quad (10.5)$$

où α et β sont les angles respectivement supérieur et inférieur du prisme. Les angles prédits par cette équation montrent la même tendance que ceux obtenus dans mes modélisations (Figure 10.3). Ils sont toutefois nettement plus faibles pour des valeurs du coefficient de frottement basal inférieur à 0,4.

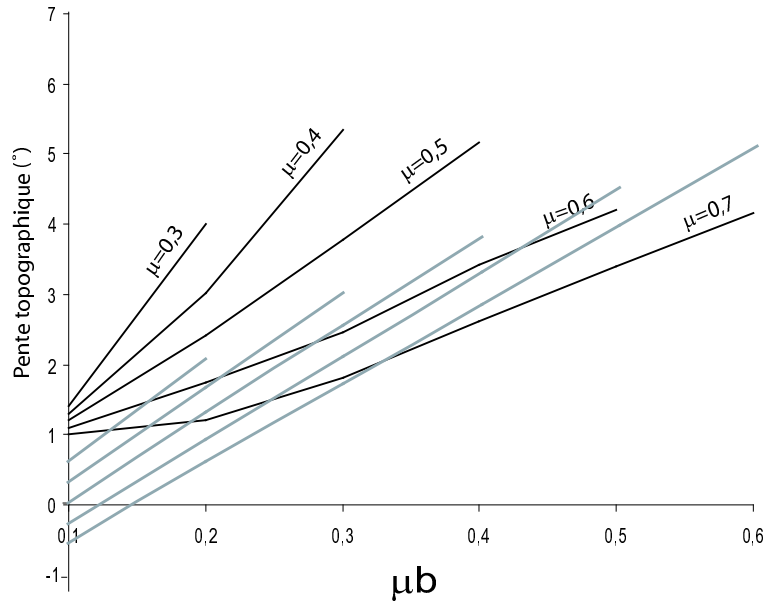


Fig. 10.3 – Pente topographique finale du prisme en fonction du frottement basal, prédits par le modèle (noir) ou par la théorie du prisme de Coulomb (gris), pour différents frottements internes.

Il faut noter que l'équation 10.5 n'est pas valable pour des frottements à la base importants, et ne peut donc pas être utilisée dans ce cas. Cependant, c'est justement pour des frottements basaux importants qu'elle donne le meilleur accord avec les prédictions de mes modèles.

De plus, comme la pente initiale imposée dans mes modélisations est positive, il est impossible dans celles-ci d'obtenir des pentes négatives, comme le prédit la loi donnée par [Dahlen *et al.*, 1984].

Enfin, l'approche que j'ai utilisée dans mes modélisations ne se base pas sur un calcul de l'état de contraintes du prisme comme dans l'article de [Dahlen *et al.*, 1984], mais sur des considérations d'énergie minimale. Il est alors possible que le modèle développé plus haut ne soit pas équivalent au modèle de prisme de Coulomb, mais qu'il permette de créer des prismes surcritiques au sens de Coulomb.

On peut remarquer que dans une certaine gamme de valeurs des paramètres ($\mu \geq 0,5$ et $\mu_b \geq 0,3$), les angles prédits par le modèle sont similaires aux angles théoriques. Ceci pourrait expliquer pourquoi [Hardy *et al.*, 1998] n'observent pas de différence sensible entre la pente d'équilibre de leur modèle et celle obtenue par la théorie de Coulomb, puisque les valeurs des paramètres qu'ils utilisent sont de ces ordres.

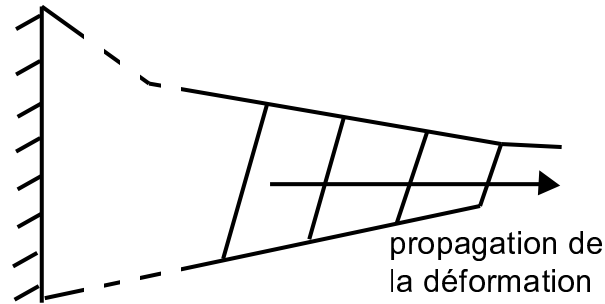


Fig. 10.4 – Schéma représentant le cas d'un prisme en contexte d'érosion peu intense. Voir le texte pour les explications

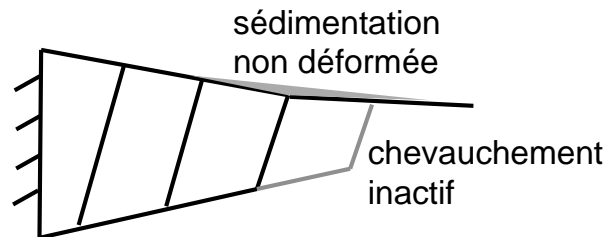


Fig. 10.5 – Schéma représentant le cas d'un prisme en contexte d'érosion très intense. Voir le texte pour les explications

10.3 Propagation frontale d'un système chevauchant

Les modélisations effectuées précédemment montrent qu'il existe deux évolutions possibles pour un système chevauchant, qui sont directement liées à la puissance de l'érosion (aux paramètres k_{fv} et p_{max} dans mes modèles) :

- Pour une érosion peu intense, le flux de matière entrant permet d'épaissir le système jusqu'à ce qu'il atteigne une pente de surface critique. A ce moment là, il glisse sur un chevauchement externe qui n'a pas encore été activé, ou sur son décollement basal, s'il n'existe plus d'écaille en avant (Figure 10.4).
- Pour une érosion très intense, le flux de matière entrant est immédiatement érodé et transporté vers l'avant. Seul le chevauchement le plus interne est alors activé. Il n'y a pas de propagation frontale (Figure 10.5). Dans certains cas, des chevauchements plus externes ont pu être activés temporairement, mais ils sont recouverts par les produits d'érosion provenant du chevauchement interne.

10.4 Application au cas Himalayen

Les observations de terrain réalisées au Front Himalayen indiquent que le stade d'avancement du prisme d'avant-pays est latéralement variable. D'autre part, la pente topographique varie latéralement, mais assez légèrement, et surtout, ces variations ne sont pas corrélées au stade d'avancement du système chevauchant frontal.

Les modélisations réalisées précédemment sont qualitativement en accord avec les prédictions théoriques de [Dahlen, 1984; Dahlen *et al.*, 1984; Davis *et al.*, 1983] et montrent que :

- La pente topographique d'équilibre dépend des caractéristiques rhéologiques du matériel entrant dans la composition du système : elle augmente lorsque le frottement basal augmente et lorsque le frottement interne diminue.
- La pente topographique d'équilibre dépend du pendage de la surface de décollement : elle diminue lorsque ce pendage augmente.
- L'érosion ne semble pas intervenir dans cette pente topographique d'équilibre.

Il est possible de relier les légères variations de pente topographiques observées en Himalaya à des variations de la rhéologie de la surface de décollement à la base des Siwaliks, à des variations du pendage de cette surface, ou de l'épaisseur de ces séries. Toutefois, les variations systématiques observées au niveau du stade d'avancement du prisme peuvent aussi être interprétées en termes de variations d'érosion. La dissymétrie de la mousson Indienne entraîne des précipitations très importantes à l'Est de la chaîne, et qui diminuent vers l'Ouest (voir Introduction). Le taux de précipitations influence les deux processus d'érosion les plus importants au Front Himalayen. D'une part, il est directement proportionnel au produit $k_f v$. D'autre part, des pluies abondantes sont susceptibles de déstabiliser de manière importante les versants, ce qui favorise les glissements de terrains. L'incision fluviale étant le processus érosif majeur influençant la propagation frontale d'un système chevauchant, j'ai choisi de raisonner sur les variations des paramètres de ce processus.

Afin de représenter les variations latérales de précipitations du Front Himalayen dans mes modélisations, on peut supposer que le produit $k_f v$ augmente vers l'Est. On peut donc se trouver dans différents cas (Figure 10.6) :

- Cas 1 : La constante d'incision fluviale est inférieure à la valeur seuil tout le long du Front Himalayen, et elle diminue vers l'Ouest.
- Cas 2 : La constante d'incision fluviale dépasse la valeur seuil dans la partie Est du Front Himalayen. Le modèle prédit alors que dans cette partie Est, le système ne pourra jamais se propager frontalement.

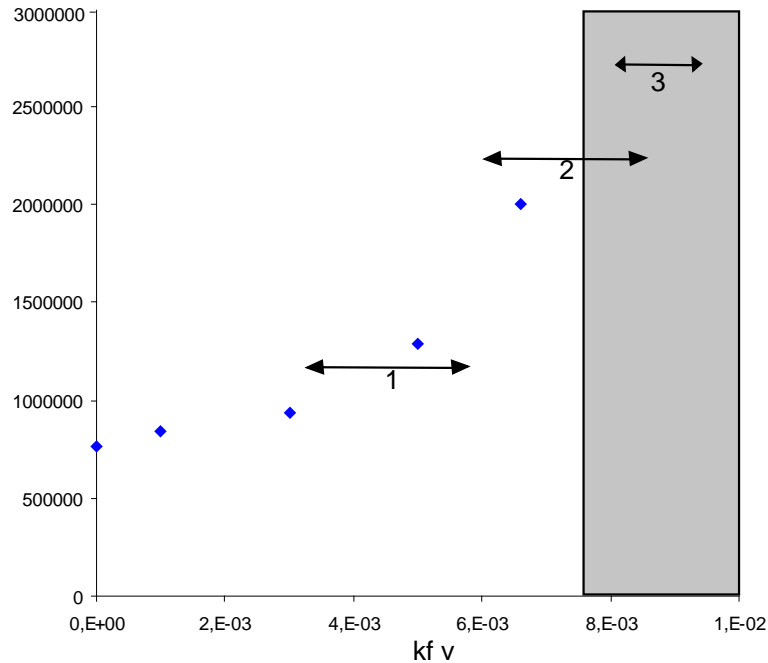


Fig. 10.6 – Variations latérales possibles du produit kfv . Cas 1 : toujours inférieur à la valeur seuil, cas 2 : supérieur à la valeur seuil dans la partie orientale de la chaîne. Cas 3 : toujours supérieur à la valeur seuil.

- Cas 3 : La constante d’incision fluviale est partout supérieure à la valeur seuil, et diminue vers l’Est. Le modèle prédit que nulle part le système ne pourra se propager frontalement.

Au Front Himalayen, les différences latérales observées au niveau du nombre de chevauchements du système ne permettent pas de départager entre ces trois cas. En effet, le Cas 1 prédit qu’à un instant donné (le stade actuel), le stade d’avancement du système chevauchant est plus avancé dans la partie occidentale de la chaîne que dans la partie orientale, ce qui est en accord avec les observations de terrain. Le Cas 2 prédit que dans la partie orientale de la chaîne, le système ne peut pas se propager frontalement, alors qu’il le peut dans la partie occidentale. Le Cas 3 prédit que le système ne peut nulle part se propager frontalement. Les données à notre disposition ne permettent pas de mettre en évidence une telle évolution : il faudrait pour cela connaître l’évolution future du système. On peut toutefois remarquer que le temps maximum nécessaire à la propagation jusqu’au quatrième chevauchement dans les modélisations précédentes n’a jamais dépassé 2 millions d’années. Or le système chevauchant frontal himalayen (en y incluant le MBT) est actif depuis au moins 8 millions d’années, et probablement au moins 10 millions d’années. Il y a donc un rapport 5 entre les durées de propagation observées et modélisées. Ceci pourrait être expliqué par le fait qu’en Himalaya, le

système ne se propage plus. Toutefois, si l'on ne prend pas en compte le MBT dans ce système chevauchant frontal, ce décalage entre prédictions des modèles et données de terrain peut être diminué.

Conclusion

Le modèle développé dans cette partie permet d'étudier l'évolution d'un système chevauchant en fonction des paramètres rhéologiques, géométriques et érosifs qui le caractérisent.

Ce modèle a permis de reproduire les tendances déjà étudiées lors d'études analogiques ou numériques et observées sur le terrain :

- L'espacement des chevauchements à l'intérieur du système dépend des paramètres rhéologiques.
- La géométrie d'équilibre du prisme, et donc sa vitesse de propagation frontale, dépend des paramètres rhéologiques.

Ce modèle a par ailleurs permis de mettre en évidence le rôle de l'érosion dans la dynamique d'évolution des systèmes chevauchants. En particulier, comme il permet de représenter de manière réaliste les processus superficiels agissant à deux dimensions, il a été possible de modéliser les processus fluviaux qui transportent la matière sur une très grande échelle spatiale. Le rôle majeur de ce processus a donc pu être mis en évidence, puisque les vitesses de propagation frontale du prisme peuvent varier d'un ordre de grandeur selon la puissance d'érosion des cours d'eau.

Dans ce modèle, l'érosion est corrélée au relief (pour les glissements de terrain et la diffusion), ainsi qu'aux précipitations (pour l'incision fluviale). Dans les Cascades, [Reiners *et al.*, 2003] ont montré que la corrélation était excellente entre les précipitations actuelles et les données d'exhumation. Toutefois, d'autres études menées à Taiwan [Dadson *et al.*, 2003] et surtout en Himalaya [Burbank *et al.*, 2003] ont mis en évidence un découplage entre ces deux paramètres : sur une échelle décennale, les séismes et typhons favorisant les glissements de terrains ne peuvent pas être négligés. Il semble d'autre part qu'il faille prendre en compte les variations d'érodabilité du substrat, ainsi que le forçage tectonique.

L'ensemble des modélisations réalisées dans la partie précédente prédisent une propagation de la déformation des zones internes vers les zones externes en première approximation. Toutefois, les chevauchements hors séquence sont nombreux, puisqu'ils représentent toujours au moins le tiers des déplacements (dans un cas sans érosion) et peuvent même représenter plus des deux tiers des déplacements. Il semble donc, à la lumière des modélisations précédentes, que les chevauchements hors séquence ne soient pas rares, mais soient même nécessaires pour que le prisme atteigne l'état d'équilibre. Ce comportement de chevauchement hors-séquence apparaît donc comme la règle plutôt que l'exception.

Enfin, la comparaison des résultats des modélisations aux observations de terrain en Himalaya permet de donner une interprétation de ces observations. Les différences observées au niveau de l'avancement du système chevauchant frontal peuvent *a priori* être le signe d'une différence des paramètres rhéologiques ou érosifs. Dans le premier cas, on pourrait penser que les paramètres rhéologiques impliquent une topographie d'équilibre plus pentée à l'Est qu'à l'Ouest de la chaîne. Dans le second cas, le transport de matière des zones internes vers les zones externes du prisme impliquerait un temps plus long de mise à l'équilibre topographique, voire même une impossibilité pour le système de se propager frontalement, le flux de matière entrant dans le système étant transporté par érosion vers une zone de sédimentation située en avant de ce système. Les variations de la pente topographique en surface étant faibles, il est probable qu'au Front Himalayen, ce sont les processus érosifs qui sont à l'origine des variations observées. Les processus érosifs doivent donc être beaucoup plus importants dans la partie orientale de la chaîne que dans la partie occidentale, ce qui est en accord avec les données climatiques disponibles (voir Introduction).

Dans la Partie suivante, nous allons voir si ces variations climatiques affectent également l'évolution érosive, topographique et tectonique à l'échelle de la chaîne entière.