

Abstract

Although the western Alps have been widely studied in the last decades, the geometry and chronology of the deformation are still controversial. This Ph.D. aims is to examine the Cenozoic evolution of the Mont-Blanc and Aiguilles Rouges, two of the external crystalline massifs (ECM) through a multidisciplinary approach that provides constraints on both the structure 3D geometry of and deformation kinematics. To unravel the 3D geometry, we performed a structural analysis based on new field data, microtectonics, and 3D geological modeling together. We used GeoModeller software to build a 3D geological model of 60 x 65 km comprising the Mont-Blanc massif, Aiguilles Rouges, Helvetic nappes, and subalpines chains. To efficiently process and store structural data, we designed a database (*DataGeol*) that contains 3955 structural measurements in 3053 localizations. Our results show a large thrusting of the Mesozoic sedimentary cover above the Aiguilles Rouges and Mont-Blanc basement toward the WNW, corresponding to a décollement level localized above the Triassic unconformity, which locally also affects the basement. The shortening accommodated by this thrust has been estimated from previously published cross sections to be between 13 and 32 km. To quantify the exhumation history, we performed 13 new thermochronological ages (AHE, AFT, ZHE, ZFT) that together with the existing data set are input into the numerical simulation of the Pecube algorithm. To quantify the simulation parameters and the associated uncertainties, we applied a method based on the inverse method coupled with Bayesian inference. Independently, timing constraints were obtained using *in situ* $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ data on six mylonites. The results of the two methods are consistent, allowing to better constrain the timing of thrust propagation in relation to the exhumation: (i) the Helvetic nappe system started immediately after the end of the Penninic nappe system at about 32 Ma. (ii) The development of the the western Mont-Blanc shear zone (MBsz) is correlated with the exhumation of the Mont-Blanc from 21 Ma to 14 Ma. Thermobarometric conditions of the deformation were estimated by petrogeochemical quantification and lattice preferred orientation of quartz crystals and suggest that the deformation occurred below 500°C and between 0.47 and 0.74 GPa. During this period, the deformation of the Helvetic nappes is coeval with that of the western MBsz, the Mont-Blanc being a duplex; (iii) the Aiguilles Rouges began to exhume after 12 Ma, before a phase of acceleration after 6 Ma; (iv) after 14 Ma, the MBsz becomes a breach thrust that cross-cut the Helvetic nappes; (v) the two massifs experienced a common recent phase of high exhumation at 1 Ma, coeval with relief building and most likely related to glacial valley incision. Globally, the Mont-Blanc massif was exhumed about 7 km more than the Aiguilles Rouges. This new tectonic model implies that three major thrust systems have propagated in sequence from the internal part to the external one and have shaped the external western Alps: the Penninic, Helvetic, and Alpine Sole thrust systems. The period between 22 and 14 Ma was a transition of the main thrust system between the Helvetic Nappes rooting above the ECM to the Alpine Sole thrust rooting

below the ECM. The late exhumation of the external ranges of the western Alps was mostly controlled by steep reverse faults, including back thrust. At that time, thick-skin deformation in the more internal part of the belt was coeval with thin-skin deformation in the external part.

Keywords: Orogen, Western Alps, 3D Geological Modeling, *in situ* $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating, Exhumation, Bayesian Inference, Thermochronology, Tectonics

Résumé

Bien que les Alpes occidentales aient été largement étudiées au cours des dernières décennies, la géométrie et la chronologie des déformations dans le prisme orogénique alpin sont encore largement débattues. L'objectif de cette thèse de doctorat est d'examiner l'évolution au Cénozoïque du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges, deux massifs cristallins externes (MCE), à travers une approche multidisciplinaire permettant de contraindre à la fois sur la structure, la géométrie 3D et la cinématique des déformations. Pour reconstruire la géométrie 3D, nous avons réalisé une analyse structurale basée sur de nouvelles données de terrain, de la microtectonique et de la modélisation géologique 3D. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel GeoModeller pour construire un modèle géologique 3D de 60 x 65 km comprenant le massif du Mont-Blanc, des Aiguilles Rouges, des nappes Helvétiques et des chaînes subalpines. Pour traiter et stocker efficacement les données de terrain, nous avons conçu une base de données (*DataGeol*) qui contient 3955 mesures structurales situées dans 3053 localisations. Nos résultats montrent un chevauchement important vers l'WNW de la couverture sédimentaire Mésozoïque au-dessus du socle des Aiguilles Rouges et du Mont-Blanc correspondant à un niveau de décollement localisé au-dessus de la discordance Triasique, mais qui affecte localement le socle. Le raccourcissement accommodé par ce chevauchement est estimé d'après des coupes géologiques publiées et se situe entre 13 et 32 km. Pour quantifier l'histoire d'exhumation, nous avons réalisé 13 nouveaux âges thermochronologiques (AHE, AFT, ZHE, ZFT) qui, une fois combinés à l'ensemble des données existantes, sont introduits dans le logiciel de simulation numérique Pecube. Pour quantifier les paramètres de simulation et les incertitudes associées, nous avons appliqué une nouvelle méthode basée sur des méthodes inverses couplées à de l'inférence Bayésienne. Indépendamment, des contraintes sur la chronologie ont été obtenues en utilisant la datation *in situ* $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sur six mylonites. Les résultats des deux méthodes sont cohérents et permettent de mieux contraindre la chronologie de la propagation de la déformation dans le prisme orogénique alpin en association avec l'exhumation : (i) le système de chevauchement des nappes Helvétiques a débuté immédiatement après la fin du chevauchement Pennique, vers 32 Ma ; (ii) Le fonctionnement de la zone de cisaillement du Mont-Blanc (MBsz) est corrélé avec l'exhumation du Mont-Blanc entre 21 Ma et 14 Ma. Les conditions thermobarométriques de la déformation ont été estimées par quantification pétrogéochimique et sur l'orientation préférentielle des cristaux de quartz et suggèrent que la déformation s'est produite en dessous de 500°C et entre 0,47 et 0,74 GPa. Pendant cette période, la déformation des nappes helvétiques est synchrone avec celle de la MBsz, le Mont-Blanc formant un duplex entre ces structures ; (iii) les Aiguilles Rouges commencent à s'exhumer après 12 Ma, avant une phase d'accélération après 5 Ma ; (iv) après 14 Ma, la MBsz devient un chevauchement qui recoupe les nappes helvétiques ; (v) les deux massifs connaissent une phase récente commune de forte exhumation à 1 Ma, contemporaine avec la formation du relief et probablement liée l'incision glaciaire Qua-

ternaire. Globalement, le massif du Mont-Blanc a été exhumé d'environ 7 km de plus que les Aiguilles Rouges. Ce nouveau modèle tectonique implique que trois grands systèmes de chevauchement se sont propagés en séquence de la partie interne à la partie externe du prisme : le système de chevauchement Pennique, Helvétique et le chevauchement basal alpin. La période comprise entre 22 et 14 Ma a été marquée par une transition entre les nappes helvétiques qui s'enracinent au-dessus des ECM et le chevauchement basal alpin qui s'enracine au-dessous des ECM. L'exhumation tardive des ECM des Alpes occidentales a été principalement contrôlée par des failles inverses raides et des rétro-chevauchements. À cette époque, la déformation en *thick-skin* dans la partie interne de la chaîne coïncidait avec la déformation en *thin-skin* dans la partie externe.

Mots clés : Orogénèse, Alpes occidentales, Modélisation géologique 3D, datations *in situ* $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Exhumation, Inférence Bayésienne, Thermochronologie, Tectonique