

TAGLIAFERRI Alessia (2023): Unravelling the heat budget of the Lepontine Dome : interdisciplinary geological, petrological, thermodynamic and geochronological study of Shear Zones

Abstract

This thesis aims to disclose the origin of the Barrovian metamorphism of the Lepontine dome. The Lepontine dome is a metamorphic and structural dome located in the Penninic domain of the Central European Alps. It was formed during the Alpine collision due to the accretion of crystalline-basement nappes which belonged to the subducting European plate. The area is characterized by a regional Barrovian metamorphism, which is expressed by isograds indicative of peak temperature conditions and by a pervasive mineral and stretching lineation in amphibolite facies. The Barrovian isograds intersect the tectonic nappe contacts, which is frequently interpreted as evidence of metamorphism that occurred after nappe emplacement. Differently, the lineation is associated with NNW-SSE directed shearing, which suggests that peak Barrovian conditions are coeval with nappe accretion. This study was tackled by combined geological mapping, U-Pb zircon dating, major and minor elements chemical analyses, petrography and petrology, two-dimensional thermo-kinematic numerical modelling at the crustal scale, one-dimensional thermal models, and inverse diffusion modelling in garnets to study the geological and thermo-mechanical evolution of the Lepontine dome and their relation to nappe overthrusting.

Geological and structural mapping combined with U-Pb dating permitted to define a crustal-scale shear zone, that we named “Maggia-Adula shear zone”. This tectonic contact is marked by synkinematic migmatites in which metamorphic zircon rims are dated at 31-33 Ma. Locally, a younger population of metamorphic zircon rim ages at 22-24 Ma is recorded in post-migmatization dikes and associated metasomatism. These intrusions likely sourced from the Southern Steep Belt (SSB) migmatitic complex bordering the Lepontine dome to the south.

The Maggia-Adula shear zone is located at the top of the Simano nappe and comprises the Cima Lunga unit. In the paragneisses of the Cima Lunga unit, magmatic and detrital zircon cores suggest that this unit was a pre-Variscan metasedimentary sequence and it is not an Alpine tectonic mélange constituted by Mesozoic fragments as commonly assumed. During Permian, this sequence was intruded by granitic sills, that are now continuous orthogneissic horizons. The Cima Lunga unit was strongly deformed during the overthrusting of a rock pile that is here named “Maggia-Adula nappe”.

The regional lineation in amphibolite facies formed during the emplacement of the Maggia-Adula nappe, until peak amphibolite-facies conditions at 31-33 Ma. During overthrusting heat was dominantly advected, as suggested by Péclet number (1–10) and Brinkman number (0.002–1.8) estimations. Also, our thermo-kinematic numerical models show that shear heating represented an additional local heat source on the Maggia-Adula shear zone and together with advection contributed to the development of inverted metamorphism around the thrust. Moreover, heat conduction during

thrusting promoted the smoothing of the temperature profiles and intersection relationships between isograds and the main thrust.

To study the cooling history after the temperature peak, we analyzed amphibolite-facies garnetparagneisses at different structural levels within the Lepontine nappe pile. These rocks contain garnets with Alpine rims that grew coevally with the amphibolite-facies metamorphic foliation. At close-to-peak temperature conditions, these rims were compositionally re-equilibrated through retrograde reactions, displayed in Mn-increase and Mg-decrease at the garnet border. Applying geothermobarometry, we estimated the post-peak temperatures of re-equilibration to range between 577 and 661 °C at pressures between 0.5 and 1.3 GPa. Multicomponent diffusion modelling applied to garnet rim profiles revealed a thermal quenching on the thrust after peak temperatures at ca. 31 Ma. This fast cooling at close-to-peak conditions of 635 °C and 0.8 GPa is quantified by apparent cooling rates of 100-400 °C/Myr within the shear zone, which are indicative of shear heating active during peak. Indeed, these cooling rate values cannot be explained by regional exhumation processes, even when high exhumation velocities are considered. Shear heating contributed to the heat transfer equilibrium generating high-grade rocks within the Maggia-Adula shear zone and migmatites in its high-strain locations.

Differently, the footwall of the Maggia-Adula thrust at the base of the Simano nappe cooled at a rate of 2 °C/Myr, which agrees with cooling rates predicted by one-dimensional thermal models simulating a regional exhumation of ca. 1 mm/yr for specific rock markers. This exhumation velocity is coherent with the typical values of a regional exhumation scenario. Differently, the apparent cooling rates within the SSB are 20-50 °C/Myr, likely due to the combination of spasmodic melt/fluid advection and diapirism in the migmatitic body which kept the temperature high within the migmatitic complex.

In summary, our results suggest that the Barrovian metamorphism of the Lepontine dome is the expression of the emplacement of the Maggia-Adula nappe, testified in the field by isograds, lineation and migmatites of 31 Ma age. The Barrovian metamorphism is mainly due to heat advected with the overthrusting of this main nappe and coeval conduction of heat. Shear heating was also effective within the Maggia-Adula shear zone during thrusting. Spatially heterogeneous cooling followed at close-to-peak conditions, possibly generating a later heating event in the frontal domains of the Penninic nappes.

Résumé

Cette thèse a pour but de révéler l'origine du métamorphisme barrovien du dôme Lépontin. Le dôme Lépontin est un dôme métamorphique et structural situé dans le domaine Pennique des Alpes d'Europe centrale. Il s'est formé lors de la collision alpine dû à l'accrétion des nappes du socle cristallin qui appartenaient à la plaque Européenne subductée. La région est caractérisée par un métamorphisme barrovien régional, qui s'exprime par des isogrades indiquant des conditions de température maximale et par une linéation minérale et d'étirement omniprésente dans le faciès amphibolite. Les isogrades barroviennes croisent les contacts tectoniques des nappes, ce qui est souvent interprété comme la preuve d'un métamorphisme survenu après la mise en place des nappes. En revanche, la linéation est associée à un cisaillement orienté NNW-SSE, ce qui suggère que les conditions barroviennes maximales coïncident avec l'accrétion des nappes. Cette étude a été réalisée en combinant la cartographie géologique, la datation U-Pb des cristaux de zircon, les analyses chimiques des éléments majeurs et mineurs, la pétrographie et la pétrologie, la modélisation numérique thermo-cinématique en 2-dimension à l'échelle de la croûte, les modèles thermiques en 1-dimension et la modélisation de la diffusion des éléments majeurs dans les grenats afin d'étudier l'évolution géologique et thermomécanique du dôme Lépontin et de leur relation avec le chevauchement des nappes.

La cartographie géologique et structurale combinée à la datation U-Pb a permis de définir une zone de cisaillement à l'échelle de la croûte, que nous avons nommée "zone de cisaillement Maggia- Adula". Ce contact tectonique est marqué par des migmatites syn-cinématiques dans lesquelles les bordures métamorphiques de zircon sont datées à 31-33 Ma. Localement, une population de bordures métamorphiques de zircon plus jeune, datées à 22-24 Ma, est enregistrée dans des filons postérieurs à la migmatisation et dans le métasomatisme qui leur est associé. Ces intrusions sont probablement originaires du complexe migmatitique de la Southern Steep Belt (SSB) qui borde le dôme Lépontin au sud.

La zone de cisaillement Maggia-Adula est située au sommet de la nappe de Simano et comprend l'unité de la Cima Lunga. Dans les paragneiss de la Cima Lunga, des coeurs de zircon magmatique et détritique suggèrent que cette unité était une séquence métasédimentaire pré-varisque et qu'il ne s'agit pas d'un mélange tectonique alpin constitué de fragments mésozoïques, contrairement à ce qui est généralement supposé. Pendant le Permien, cette séquence a été intrudée par des filons-couches granitiques, qui constituent aujourd'hui des horizons orthogneissiques continus. La Cima Lunga a été fortement déformée pendant le chevauchement d'une pile de roches appelée ici "nappe de la Maggia- Adula".

La linéation régionale dans le faciès amphibolite s'est formée pendant la mise en place de la nappe Maggia-Adula, jusqu'aux conditions maximales du faciès amphibolite à 31-33 Ma. Pendant le chevauchement, la chaleur a été principalement transportée par advection, comme le suggèrent les estimations du nombre de Péclet (1-10) et du nombre de Brinkman (0.002-1.8). En outre, nos modèles numériques thermo-

cinématiques montrent que le chauffage par cisaillement a représenté une source de chaleur locale supplémentaire dans la zone de cisaillement Maggia-Adula et a contribué, avec l'advection, au développement du métamorphisme inversé autour du cisaillement. En plus, la conduction de la chaleur pendant le chevauchement a favorisé le lissage des profils de température et les relations d'intersection entre les isogrades et la zone de cisaillement Maggia-Adula.

Pour étudier l'histoire du refroidissement après le pic de température, nous avons analysé des paragneiss à faciès amphibolite contenant des grenats à différents niveaux structuraux dans les nappes Léponentines. Ces roches contiennent des grenats à bordures alpines qui se sont développés en même temps que la foliation métamorphique du faciès amphibolite. Dans des conditions de température proches du maximum, la composition de ces bordures a été rééquilibrée par des réactions rétrogrades, ce qui se manifestent par une augmentation de manganèse et une diminution de magnésium à la marge du grenat. En appliquant la géothermobarométrie, nous avons estimé que les températures de rééquilibration après le pic thermique se situaient entre 577 et 661 °C à des pressions comprises entre 0.5 et 1.3 GPa. La modélisation de la diffusion multicomposante appliquée aux profils des bords des grenats a révélé une trempe thermique dans la zone de cisaillement après le pic de température à environ 31 Ma. Ce refroidissement rapide dans des conditions proches du pic à 635 °C et 0.8 GPa est quantifié par des taux de refroidissement apparents de 100-400 °C/Ma dans la zone de cisaillement, qui indiquent un chauffage par cisaillement actif pendant le pic. En effet, ces taux de refroidissement ne peuvent pas être expliqués par des processus d'exhumation régionaux, même si on considère des vitesses d'exhumation élevées. Le chauffage par cisaillement a contribué à l'équilibre du transfert de chaleur générant des roches à haute degré de métamorphisme dans la zone de cisaillement Maggia- Adula et des migmatites dans les zones de forte déformation.

Par contre, sous le chevauchement Maggia-Adula, à la base de la nappe de Simano, le refroidissement s'est produit à une vitesse de 2 °C/Ma, ce qui correspond aux vitesses de refroidissement prévues par les modèles thermiques à 1-dimension simulant une exhumation régionale d'environ 1 mm/a pour des marqueurs rocheux spécifiques. Cette vitesse d'exhumation est cohérente avec les valeurs typiques d'un scénario d'exhumation régionale. Différemment, les taux de refroidissement apparents à l'intérieur du SSB sont de 20-50 °C/Ma, probablement en raison de la combinaison de l'advection spasmodique de roches fondues ou des fluides et du diapirisme dans le corps migmatitique qui a maintenu la température élevée à l'intérieur du complexe migmatitique.

En résumé, nos résultats suggèrent que le métamorphisme barrovien du dôme Lépointin est l'expression de la mise en place de la nappe de Maggia-Adula, attestée sur le terrain par des isogrades, une linéation constante et des migmatites d'un âge de 31 Ma. Le métamorphisme barrovien est principalement dû à la chaleur advectée par le chevauchement de cette nappe principale et à la conduction simultanée de la chaleur.

Le chauffage par cisaillement a également été efficace dans la zone de cisaillement Maggia-Adula pendant le chevauchement. Un refroidissement hétérogène dans l'espace a suivi dans des conditions proches du maximum, générant peut-être un réchauffement ultérieur dans les domaines frontaux des nappes Penniques.