Résumé

Les météorites ferreuses sont des alliages Fe-Ni qui représentent des échantillons de noyaux d'astéroïdes différenciés. Une minorité de ces météorites ferreuses contiennent des inclusions silicatées et sont appelées météorites ferreuses silicatées ou non magmatiques. La présence d'inclusions silicatées chimiquement évoluées dans un métal Fe-Ni de haute densité pose certaines questions à propos de leur origine. Le groupe IIE appartient aux météorites ferreuses non magmatiques et contient des inclusions silicatées primitives et des inclusions silicatées évoluées. L'objet de cette thèse est d'étudier les processus de formation des météorites ferreuses silicatées en examinant les météorites ferreuses primitifs IIE.

Le **premier chapitre** propose un aperçu de l'état de l'art sur les météorites ferreuses silicatées et souligne les questions ouvertes existantes. **Le second chapitre** fait état des techniques analytiques les plus importantes qui ont été utilisées pendant cette thèse. Le **troisième chapitre** contient l'ensemble de la recherche effectuée sur la météorite Mont Dieu, un nouveau membre primitif du groupe IIE. Cette météorite est un membre unique du groupe IIE dans la mesure où elle contient des chondres dans ses inclusions de silicate. Avec la météorite Netschaëvo, elle est la seule météorite ferreuse qui montre une texture si primitive. En se basant sur la minéralogie, la composition en éléments majeurs et la composition de l'isotope d'oxygène, nous concluons que Mont Dieu tire son origine d'une chondrite H. L'observation d'une série de caractéristiques, incluant un noircissement de silicates, des larges veines de métal contenant des fragments de roches angulaires, et le besoin d'une source de chaleur hétérogène, a conduit à une origine liée à l'impact pour Mont Dieu. Le **quatrième chapitre** est dédié à l'examen de deux échantillons de la météorite primitive Netschaëvo, qui montre des lithologies très différentes de celles décrites dans la littérature. Les parties examinées de Netschaëvo peuvent être classées comme des roches fondues d'impact (*impact melt rock, IMR*). Nous démontrons que le matériel précurseur de ces IMR et les fragments primitifs trouvent leur origine dans le même corps parent. L'occurrence des deux lithologies dans la même météorite suggère que Netschaëvo est une brèche contenant des fragments métamorphosés et d'IMR et que la météorite s'est formée à la suite d'un évènement d'impact. Le **cinquième chapitre** se concentre sur le matériel matriciel à grains fins trouvé dans les inclusions silicatées de Netschaëvo IIE. Cette étude fournit un aperçu des environnements de frontière noyau-manteau et confirme l'origine d'impact de Netschaëvo par la présence de

minéraux et de textures orientant vers un refroidissement très rapide. Nos recherches montrent que la re-séparation du phosphore du métal dans le matériau silicaté pendant le refroidissement pourrait être un processus général pendant la différentiation planétaire. Dans le **sixième** chapitre, les veines présentes dans les inclusions silicatées de Mont Dieu sont décrites en détail et comparées avec les structures veineuses trouvées dans le silicate de Techado IIE. Les caractéristiques des processus causant la formation de ces veines sont discutées.

Le **septième chapitre** résume les conclusions de cette thèse. Les examens pétrographiques et géochimiques détaillés conduits sur les échantillons étudiés montrent que les collisions ont joué un rôle majeur dans la formation des météorites ferreuses IIE. Le travail effectué dans le cadre de cette thèse fournit une contribution importante à une compréhension plus complète et plus approfondie des mécanismes de formation des météorites ferreuses silicatées.

Samenvatting

Ijzermeteorieten zijn Fe-Ni legeringen waarvan men denkt dat ze afkomstig zijn van de kernen van gedifferentieerde asteroïden. Een minderheid van de ijzermeteorieten bevat silicaat inclusies, namelijk de silicaathoudende ijzermeteorieten, ook wel niet-magmatische ijzermeteorieten genoemd. Het feit dat chemisch geëvolueerde silicaat insluitsels aanwezig zijn in een Fe-Ni legering met een hoge densiteit, maakt het moeilijk hun oorsprong te begrijpen. De IIE groep behoort tot de niet-magmatische ijzermeteorieten en bevat zowel primitieve als chemisch geëvolueerde silicaat insluitsels. Het doel van dit doctoraat is het gedetailleerd onderzoeken van de primitieve IIE meteorieten met als doel de vormingsprocessen van de silicaathoudende ijzermeteorieten beter te begrijpen.

Het **eerste hoofdstuk** geeft een overzicht van de kennis en de onbeantwoorde vragen in het gebied van de silicaathoudende ijzermeteorieten. In het **tweede hoofdstuk** worden de belangrijkste analytische technieken, gebruikt in dit doctoraatsonderzoek, besproken. Het **derde hoofdstuk** bevat al de analyses en resultaten gerelateerd aan de Mont Dieu meteoriet, een nieuw lid van de IIE groep. Deze meteoriet is een uniek lid van de IIE groep omdat de silicaat inclusies chondrules bevatten. Samen met Netschaëvo zijn dit de enige twee meteorieten van de IIE groep die zo een primitieve silicaten bezitten. De algemene mineralogie, de chemische samenstelling en de zuurstofisotopsische samenstelling wijzen uit dat Mont Dieu ontstond als een H chondriet. Mont Dieu werd waarschijnlijk gevormd in een impact scenario. De belangrijkste observaties die dit ondersteunen, zijn silicaat verdonkering, de dikke ijzeraders gevuld met hoekige silicaat fragmenten, en de noodzakelijke heterogene warmtebron. In het **vierde hoofdstuk** worden twee fragmenten van de Netschaëvo meteoriet onderzocht waarvan de lithologie heel verschillende is dan de reeds onderzochte fragmenten in de literatuur. De onderzochte fragmenten kunnen het best beschreven worden als *impact melt rocks* (IMR). Er wordt aangetoond dat de IMR en de primitieve inclusies afkomstig zijn van hetzelfde moederlichaam. Op basis van de aanwezigheid van deze verschillende types silicaatinclusies kan Netschaëvo best omschreven worden als een breccia die zowel primitieve als IMR fragmenten bevat en dit duidt op het feit dat Netschaëvo gevormd werd tijdens een inslag. Het **vijfde hoofdstuk** beschrijft het fijnkorrelige matrix materiaal in de IMR inclusies van Netschaëvo. Deze studie geeft een kijk op de processen in de kern-mantel regio en de aanwezigheid van mineralen die gevormd moeten worden onder snelle afkoeling bevestigen

de hypothese dat Netschaëvo werd gevormd in een inslag. Deze studie toont aan dat de fosfor zich verplaatst van de metaal fase naar de silicaat fase tijdens de afkoeling en dat dit waarschijnlijk een algemeen proces is tijdens planetaire differentiatie. De aders aanwezig in de Mont Dieu meteoriet worden verder onderzocht in het **zesde hoofdstuk** en vergeleken met de ader structuren aanwezig in de Techado meteoriet. De verschillende processen die mogelijk hebben geleid tot de vorming van deze aders worden besproken.

Het **zevende hoofdstuk** vat de conclusies van dit doctoraat samen. De gedetailleerde petrografische en geochemische analysen die uitgevoerd werden op de onderzochte meteorietfragmenten tonen aan dat inslagen een belangrijke rol speelden in het ontstaan van de IIE ijzermeteorieten. Het onderzoek verricht in het kader van dit doctoraat levert een belangrijke bijdrage tot een diepgaand en volledig begrip van de processen die bijdroegen tot de vorming van silicaathoudende ijzermeteorieten.

Summary

Iron meteorites are Fe-Ni alloys that are thought to represent samples of the cores of differentiated asteroids. A minority of the iron meteorites contain silicate inclusions, the so-called silicate-bearing or non-magmatic iron meteorites. The presence of chemically evolved silicate inclusions in a high-density Fe-Ni metal raises questions about their origin. The IIE group belongs to the non-magmatic iron meteorites and contains primitive as well as evolved silicate inclusions. The object of this thesis is to investigate the formation processes of the silicate-bearing iron meteorites by examination of the primitive IIE irons.

The first chapter provides an overview of the state of the art of silicate-bearing iron meteorites and highlights the existing open questions. The **second chapter** discusses the most important analytical techniques that have been used during this thesis. The **third chapter** contains all the research conducted on the Mont Dieu meteorite, a new primitive member of the IIE group. This meteorite represents a unique member of the IIE group as it contains chondrules in its silicate inclusions. Together with the Netschaëvo meteorite, they are the only two IIE irons that show such a primitive texture. Based on the mineralogy, the major element composition and the oxygen isotope composition, we conclude that Mont Dieu originated as an H chondrite. The observation of a series of features, including silicate darkening, thick metal veins containing angular clasts, and the need for a heterogeneous heat source, led to an impact-based origin for Mont Dieu. The **fourth chapter** is dedicated to the investigation of two samples of the primitive Netschaëvo IIE meteorite, that show lithologies that are very different to those described in the literature. The investigated pieces of Netschaëvo can be classified as impact melt rocks (IMR) and we show that the precursor material of these IMR and the primitive clasts both originated from the same parent body. The occurrence of both lithologies in the same meteorite suggests that Netschaëvo itself is a breccia containing metamorphosed and IMR clasts and that the meteorite formed as the result of an impact event. The **fifth chapter** focuses on the fine-grained matrix material found in the silicate inclusions of Netschaëvo IIE. This study provides insights into core-mantle boundary environments and confirms the impact-origin of Netschaëvo by the presence of minerals and textures pointing to a very rapid cooling. The investigations show that the re-partitioning of phosphorus from the metal into the silicate material during cooling might be a general process during planetary differentiation. In the **sixth chapter**, the veins present in the silicate inclusions of Mont Dieu

are described in detail, and compared to the veining structures found in Techado IIE silicate. The characteristics of the processes causing the formation of these veins are discussed.

The **seventh chapter** summarizes the conclusions of this thesis. The detailed petrographic and geochemical examinations conducted on the investigated samples show that collisions played a major role in the formation of the IIE iron meteorites. The work performed in the framework of this thesis provides a significant contribution towards a more complete and in-depth understanding of the formation mechanisms of silicate-bearing iron meteorites.