

# Atmospheric stable water isotope measurements at the timescale of extratropical weather systems

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Scholder-Aemisegger, Franziska

**Publication date:**

2013

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-009989698>

**Rights / license:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

**Atmospheric stable water isotope measurements  
at the timescale of extratropical  
weather systems**

A dissertation submitted to  
ETH ZURICH

for the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES

presented by  
FRANZISKA SCHOLDER-AEMISEGGER  
Msc in Environmental Engineering, ETH Zurich  
born on 22 March 1985  
citizen of Stein am Rhein (SH), Switzerland

accepted on the recommendation of:

Prof. Dr. Heini Wernli  
Dr. Harald Sodemann  
Dr. Stephan Pfahl  
Prof. Dr. Markus Leuenberger

# Abstract

Human activities and technological developments have always been tightly conditioned by the hydrological cycle. Understanding the processes involved in the atmospheric branch of the water cycle and particularly the atmospheric transport pathways of water is thus of primary importance for anticipating impacts of climate change on anthropogenic activities. Stable water isotopes can be useful in this respect as they are naturally available tracers of phase changes of water in the atmosphere and can provide us information on important moist atmospheric mechanisms and atmosphere-surface interaction processes like evaporation from land and ocean or transpiration from the vegetation.

In this thesis measurements of water vapour isotopes with high temporal resolution (from seconds to hours) in the continental and oceanic boundary layer are presented and interpreted using complementary modelling tools. Fast variations of stable water isotopes in water vapour have become measurable lately using novel laser spectroscopic techniques. The primary aim of this thesis is to perform process-based investigations of the atmospheric water cycle at the timescale of weather systems using laser spectroscopic measurements of water vapour isotopes. An important prerequisite for such studies, requiring automatic field measurements over several weeks or even months, is a detailed knowledge about the sources of uncertainty of this new measurement technique.

In the first part of this thesis, a comprehensive characterisation and comparison study of two commercial laser spectroscopic systems based on cavity ring-down spectroscopy (Picarro) and off-axis integrated cavity output spectroscopy (Los Gatos Research) is presented. The uncertainty components of the measurements have been assessed in laboratory experiments. The knowledge from these tests and concurrent measurements of atmospheric isotopes in ambient water vapour using the two analysers allowed evaluating the precision and accuracy of atmospheric  $\delta^2\text{H}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  as well as deuterium excess ( $d = \delta^2\text{H} - 8\delta^{18}\text{O}$ ) measurements.

In the second part of the thesis, ground-based measurements in the atmospheric boundary layer at a prealpine weather station (Rietholzbach) are presented. A Lagrangian moisture source identification algorithm has been used to investigate the relation between  $d$  in continental low-level moisture and relative humidity during evaporation  $h$  at the moisture

source. The temporal correlation pattern of  $d$  and  $h$  found in this thesis exhibits modes of strong anticorrelation at the timescale of one day. They can be explained by either a higher than normal contribution of ocean sources or the dominance of soil evaporation over plant transpiration. Periods with a weak or almost non-existent relationship between  $d$  and  $h$  coincide with substantial moisture contribution from plant transpiration. Thus, the strength of the  $d$ - $h$  relationship can serve as a proxy for assessing the contribution of ocean evaporation, soil evaporation and plant transpiration to ambient water vapour.

At timescales shorter than one day local boundary layer mixing dominates over the low frequency control on  $d$  exerted by  $h$  at the evaporation site. Especially in summer, processes linked to the local turbulent heat fluxes are the main drivers of variations in the isotopic composition of water vapour in Rietholzbach. A simple box model approach has been applied to characterise these local effects and to complement the Lagrangian perspective of large-scale moisture advection. The relative importance of the local water cycle dynamics as compared to the effect of remote phase changes can thus be characterised using water isotope measurements.

Three case studies of collocated rain and vapour isotope measurements are presented in the third part of this thesis. An isotope-enabled limited-area model has been applied for investigating these cases. By combining measurements with results from numerical model simulations, we could illustrate the use of water isotopes in atmospheric moisture as a constraint for validation of the model representation of processes like evaporation and below-cloud interaction of rain with low-level water vapour.

In the last part of this thesis, water vapour isotope data are presented that have been measured on-board an aircraft during the first special observation period in the framework of the international research programme “Hydrological Cycle in the Mediterranean Experiment” (HyMeX). The measurement setup as well as the calibration procedure are described, and the data quality is discussed. First analyses reveal interesting features in the horizontal and vertical distribution of water vapour isotopes, and in their day-to-day variability.

Overall, this thesis, together with other recently published studies, gives first insight into short-term variations of stable isotopes in low tropospheric water vapour. The measurements in the continental interior in a prealpine setting as well as in the Mediterranean provide unique data for studying the water cycle at the timescale of extratropical weather systems. Further research using this valuable data in combination with various model approaches may yield new insights into several important processes involved in the climate system like ocean and land surface evaporation fluxes, continental moisture recycling, boundary layer mixing and interaction with the free troposphere, as well as below-cloud evaporation of rain.

# Résumé

Les activités humaines et les progrès techniques ont toujours été étroitement conditionnés par le cycle de l'eau. Pour anticiper les impacts du changement climatique sur les activités anthropiques, il est primordial de comprendre les processus impliqués dans la branche atmosphérique du cycle hydrologique. En tant que traceurs naturels des changements de phase de l'eau dans l'atmosphère, les isotopes stables de l'eau sont utiles dans ce contexte. Ils nous fournissent des informations sur les mécanismes liés à l'humidité dans l'atmosphère ainsi que sur les processus d'interaction entre l'atmosphère et la surface terrestre comme l'évaporation du sol et de l'océan, ainsi que sur la transpiration de la végétation.

Dans cette thèse sont présentées des mesures, avec une résolution temporelle élevée ( $1\text{ s} \leq \Delta t \leq 1\text{ jour}$ ), de la concentration en isotopes lourds de l'eau. Ces mesures, qui ont été effectuées dans la couche limite continentale et océanique, sont interprétées avec des outils de modélisation complémentaires. Les variations à haute fréquence des isotopes stables de l'eau sont mesurables depuis peu avec de nouvelles techniques basées sur la spectroscopie laser. Le but premier de cette thèse est de réaliser des études ciblées sur les processus liés au cycle atmosphérique de l'eau à l'échelle temporelle des systèmes météorologiques. Pour cela des mesures spectroscopiques de la teneur en isotopes lourds de la vapeur atmosphérique ont été effectuées sur une durée de plusieurs semaines à plusieurs mois. Une connaissance détaillée sur les sources d'incertitude lié à ces nouvelles techniques de mesures est un prérequis pour ce genre d'analyses du cycle de l'eau à l'aide des isotopes.

Dans la première partie de cette thèse une étude de caractérisation et comparaison de deux spectromètres laser commerciaux est présentée. Le premier est basé sur le principe de la spectroscopie par absorption laser dans un résonateur optique en anneau (Picarro). Le second utilise le principe d'absorption laser intégrée en cavité résonnante hors axe (Los Gatos Resarch). Les composantes de l'incertitude des mesures ont été évaluées lors d'expériences en laboratoire. Par la suite, des mesures simultanées de la composition isotopique de la vapeur d'eau ambiante avec les deux types d'instruments ont été conduites. Les connaissances acquises par l'intermédiaire de ces tests nous ont permis

d'évaluer la précision et les biais des mesures laser de  $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  et du deuterium excess ( $d = \delta^2\text{H} - 8\delta^{18}\text{O}$ ) dans la vapeur d'eau atmosphérique.

Dans la seconde partie de cette thèse, sont présentées des mesures au niveau du sol de la teneur en isotopes lourds de la vapeur d'eau dans la couche limite réalisées à une station météorologique préalpine à Rietholzbach. Un algorithme Lagrangien d'identification des points d'évaporation de l'humidité est utilisé pour examiner la relation entre  $d$  dans l'humidité continentale de la basse troposphère et l'humidité relative  $h$  qui régnait lors de l'évaporation. La série temporelle de corrélation entre  $d$  et  $h$  présentée ici, montre des périodes de forte anticorrélation à l'échelle temporelle journalière. L'existence de ces périodes de forte anticorrélation peut être expliquée par une dominance de la contribution de sources océaniques ou de l'évaporation du sol. Les périodes caractérisées par une relation faible ou même inexistante entre  $d$  et  $h$  coïncident avec une contribution substantielle de la transpiration végétale à l'humidité ambiante. Les caractéristiques de la relation  $d$ - $h$  peuvent donc servir de proxy pour attribuer l'origine de l'humidité ambiante aux différents processus d'échange entre l'atmosphère et la surface terrestre que sont l'évaporation océanique, l'évaporation du sol ainsi que de la transpiration végétale.

À l'échelle de temps intra-journalière les effets locaux sur  $d$ , comme la turbulence de la couche limite dominant sur l'effet à basse fréquence de  $h$  au site d'évaporation. En particulier en été, les processus locaux liés aux flux turbulents de surface sont les principaux contrôles des variations isotopiques dans la vapeur d'eau à Rietholzbach. Un modèle de bilan de vapeur d'eau dans la couche limite est utilisé pour caractériser ces effets locaux et pour compléter la perspective Lagrangienne de l'advection d'humidité à grande échelle. L'importance relative de la dynamique locale du cycle de l'eau comparé aux effets de changements de phase éloignés peut être ainsi décrite.

Trois études sur des mesures simultanées d'isotopes dans la pluie et la vapeur d'eau sont présentées dans la troisième partie de cette thèse. Un modèle régional de prévision météorologique équipé de la physique des isotopes a été utilisé pour l'analyse de ces trois cas. En combinant des mesures et un modèle numérique, nous avons pu montrer que les isotopes de l'eau dans l'atmosphère sont utiles pour la validation de la paramétrisation de processus comme l'évaporation des sols et l'interaction entre la pluie et la vapeur d'eau sous la strate nuageuse.

Dans la dernière partie de cette thèse, des mesures d'isotopes dans la vapeur d'eau sont présentées, qui ont été effectuées à bord d'un avion pendant la première période d'observation intense du programme de recherche international HyMeX. Cette campagne de mesure a eut lieu dans le bassin méditerranéen. L'installation du système de mesure, la procédure de calibration, ainsi que la qualité des données sont discutées. Les premières analyses révèlent des traits caractéristiques intéressants de la distribution horizontale et verticale ainsi que de la variabilité inter-journalière des isotopes dans la vapeur d'eau.

En résumé, cette thèse ainsi que d'autres études récemment publiées donnent un premier aperçu des variations à court terme des valeurs isotopiques dans la vapeur d'eau de la basse troposphère. Les mesures effectuées dans un environnement continental préalpin ainsi qu'en Méditerranée fournissent des données uniques pour l'étude du cycle de l'eau à l'échelle temporelle des systèmes météorologiques extratropicaux. Dans le future, l'usage de ces mesures en combinaison avec différentes approches de modélisation isotopique peuvent nous ouvrir de nouvelles portes pour l'étude de plusieurs processus importants du système climatique comme l'évaporation des sols et des océans, le recyclage continental de l'eau, la turbulence dans la couche limite, l'interaction entre la couche limite et la troposphère libre ainsi que l'évaporation de la pluie sous la strate nuageuse.