

# Téledétection multi-échelle des lacs depuis un aéronef ultraléger motorisé

Le projet Léman-Baïkal, fruit d'une collaboration scientifique entre la Russie et la Suisse, a permis de développer une nouvelle plateforme de téledétection utilisant des techniques d'imagerie multispectrale et hyperspectrale. Cette plateforme a été testée avec succès sur un aéronef ultraléger motorisé aussi bien au-dessus des lacs que des terres. Cet article présente la méthodologie développée pour la plateforme de téledétection, ainsi que les premiers résultats.

*Im Rahmen des Projekts Léman-Baïkal, das aus einer wissenschaftlichen Zusammenarbeit zwischen Russland und der Schweiz entstand, wurde eine neue Fernerkundungsplattform entwickelt, die multi- und hyperspektrale Bildtechnologie integriert. Mit einem motorisierten Ultraleichtflugzeug wurde diese Plattform erfolgreich getestet, sowohl über Seen wie auch über Land. Dieser Artikel stellt die entwickelte Methodik sowie die ersten Ergebnisse vor.*

Il progetto Léman-Baïkal, frutto di una collaborazione scientifica tra la Russia e la Svizzera, ha permesso di sviluppare una nuova piattaforma di teledetezione utilizzando le analisi d'immagine multispettrale e iperspettrale. Questa piattaforma è stata testata con successo sia su laghi che terre emerse con voli in aeromobile ultraleggero motorizzato (ULM). Questo articolo presenta la metodologia sviluppata per la piattaforma di teledetezione e i suoi primi risultati.

Y. Akhtman, D. Constantin,  
M. Rehak, V. Nouchi, G. Shinkareva,  
D. Bouffard, N. Pasche, S. Chalov,  
U. Lemmin, B. Merminod

Les techniques d'exploration et d'étude de la Terre ont radicalement changé avec l'arrivée des méthodes de téledétection [1]. Désormais, l'imagerie multispectrale et hyperspectrale depuis des satellites ou des avions est largement utilisée pour analyser les changements naturels ou anthropiques [2]; et ceci en particulier au-dessus des masses d'eau [3]. Les récentes avancées technologiques ont rendu les équipements de téledétection encore plus accessible et désormais on s'intéresse aux analyses multi-échelles combinant des données de plusieurs sources: satellite, avion, mesure au sol [4]. De par ses dimensions et le long historique d'utilisation de différentes tech-

niques de téledétection, le lac Baïkal est exceptionnel. Récemment, Sutyra a utilisé des données de Radiométrie Avancée à Très Haute Résolution (AVHRR) pour cartographier l'évolution de la glace entre 1998 et 2005 [5]. Le même auteur a cartographié la température à la surface du lac et de l'atmosphère avec des données AVHRR [6]. La modification du paysage a également été étudiée avec des données AVHRR combinées à un radiomètre spectral pour imagerie de résolution moyenne (MODIS) [7]. Enfin, Ivanov *et al.* ont étudié les changements de la morphologie du delta de la Selenga [8].

Ce papier présente la méthodologie et les résultats initiaux de la première phase du projet Léman-Baïkal, qui s'est déroulée au printemps 2013 et en hiver 2014 sur le lac Léman et en été 2013 sur le lac Baïkal. L'objectif de ce projet est de conduire une étude comparative de ces deux grands lacs.

## Méthodologie

L'étude se base sur des mesures simultanées depuis:

- un aéronef ultraléger motorisé (ULM) équipé d'une plateforme de téledétection;
- un bateau équipé de radiomètres et de différents instruments pour quantifier la qualité de l'eau (fig. 1).

Une partie importante du projet Léman-Baïkal consistait à développer et tester l'utilisation d'une plateforme d'imagerie multispectrale et hyperspectrale sur un ULM, aussi bien au-dessus des lacs que des terres. Cette plateforme comprend quatre caméras, des capteurs pour déterminer la position et l'orientation, ainsi que tout le matériel nécessaire pour synchroniser et stocker les données. L'instrument principal est une caméra hyperspectrale Headwall Photonics Micro Hyperspec VNIR auquel s'ajoute deux caméras RGB (Sony NEX-5R) et une caméra thermique infrarouge (DIAS Pyroview Compact). La figure 2 illustre le dispositif expérimental et son montage sur l'ULM.

Parallèlement, des mesures *in situ* sont effectuées afin de caractériser les propriétés optiques de l'eau du lac et d'en déduire les propriétés biologiques et chimiques. Ces mesures ponctuelles permettent ensuite de valider les données récoltées par l'ULM et de déduire des cartes des propriétés de l'eau à partir des données hyperspectrales de l'ULM. Trois différents types de radiomètres ont été utilisés depuis le bateau: (i) USB 200+ d'Ocean Optics, (ii) WISP3 de WaterInsight et (iii) Ramses de Trios Optical Sensors. En plus des mesures de radiation, les propriétés biogéochimiques de la colonne d'eau ont été analysées par (i) prélèvements d'eau pour mesurer le taux de chlorophylle a, le taux de carbone dissous et la concentration de particules, et (ii) profils CTD (Conductivity, Temperature and Depth), avec le capteur CTD19+V2 de Seabird qui mesure également la concentration en chlorophylle a et la turbidité. Finalement, tous ces paramètres sont utilisés pour interpréter les données de l'ULM grâce à des réseaux de neurones.

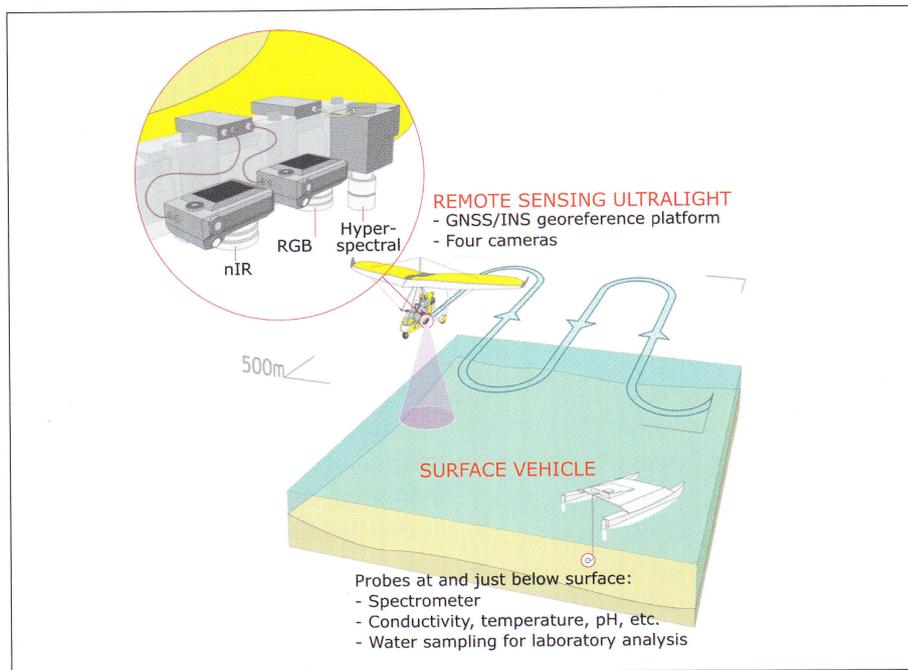


Fig. 1: Acquisition simultanée des données dans les airs et sur l'eau.

Cette méthodologie nécessite une parfaite coordination des trajectoires des ULM et des positions des mesures effectuées depuis un bateau, comme illustré sur les figures 3 et 4. Les sites de mesures ponctuelles ont également été choisis afin de maximiser la variabilité des propriétés biogéochimiques de l'eau.

## Analyse des données

Le traitement des données issues de la plateforme montée sur l'ULM est particulièrement complexe. On présente ici les principales étapes du traitement des

données brutes des radiomètres et de navigation.

- Correction géométrique et radiative pour chaque balayage afin de prendre en compte les distorsions dues aux lentilles et aux radiomètres
- Correction atmosphérique prenant spécifiquement en compte les conditions d'ensoleillement, ainsi que les caractéristiques de la propagation de la lumière dans l'atmosphère
- Evaluation de la réflectance à la surface grâce aux données d'irradiance
- Orthorectification et géoréférencement (selon le Modèle Numérique de Terrain)

Les performances de la chaîne de traitement du signal sont montrées sur la figure 4 détaillant également un exemple de trajet de l'ULM et de mesure au sol près du delta du Rhône sur le lac Léman (mesure du 7 mars 2014). Toutes les phases de traitement n'ont pas encore été optimisées. Dans le cadre du projet Léman-Baïkal, nous avons développé et déployé une base de données ainsi qu'une structure de gestion sur le web afin d'optimiser le stockage, la recherche, l'extraction et la visualisation des données collectées sur le terrain. Une telle interface est essentielle pour les diverses équipes chargées d'interpréter les résultats, afin qu'elles puissent extraire les données pertinentes et leur appliquer leurs algorithmes d'analyse.

## Acquisition des données et résultats initiaux

Durant la phase de développement et de test du système nous avons réalisé une série de vols sur le Lac Léman en avril/mai 2013 et février/mars 2014. Spécifiquement, nous nous sommes concentrés sur les embouchures de la Venoge et du Rhône afin d'étudier l'impact des principales rivières du Léman sur la qualité de ses eaux.

Lors de l'étape suivante du projet en juin/juillet 2013, nous avons réalisé une campagne de mesure au Sud de la Sibérie aux alentours de la rivière Selenga. Cette campagne a été réalisée en collaboration avec la faculté de Géographie de l'Uni-

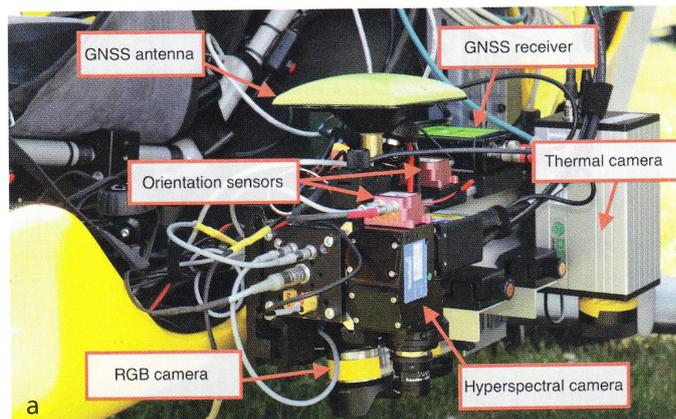


Fig. 2: Plateforme d'imagerie multi- et hyper-spectrale pour la télédétection (a) installée sur un ULM Tanarg 912S de Air Création (b).

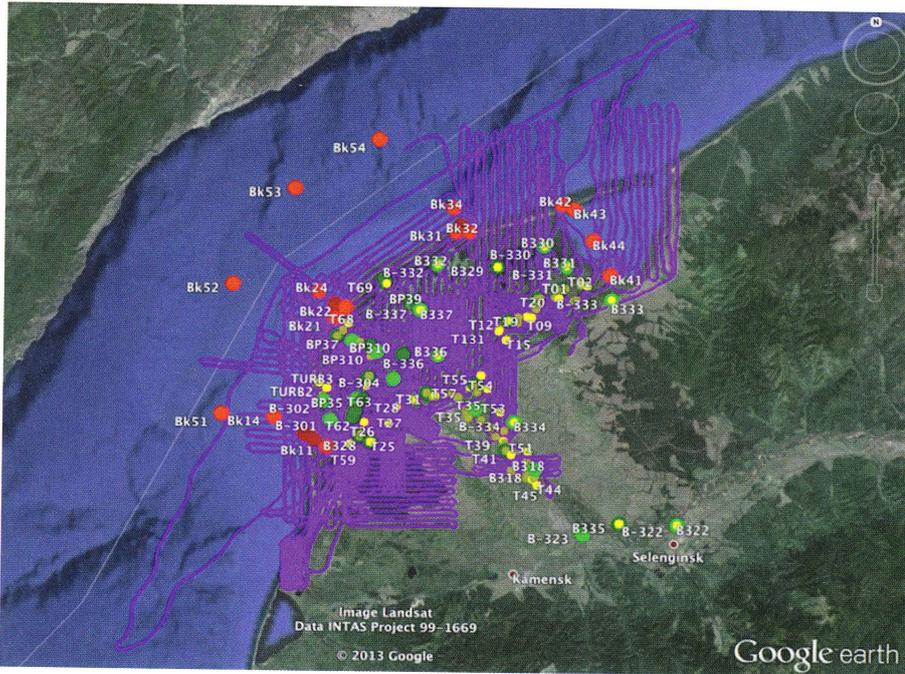


Fig. 3: Trajectoires de l'ULM (violet) et mesures in situ (points rouges, jaunes et verts) pour le delta de la Selenga (lac Baïkal). Les mesures ont été effectuées pendant la première phase du projet en juillet 2013.

versité de Moscou (Lomonosov Moscow State University, [www.msu.ru/en](http://www.msu.ru/en)) et de l'Institut Baïkal pour la gestion des ressources naturelles (Baikal Institute of Nature Management, [www.binm.ru/binm/](http://www.binm.ru/binm/)) d'Ulan Ude. En plus des observations aériennes, on a récolté des échantillons d'eau et réalisé des profils CTD incluant le fluor et la turbidité, ainsi que des mesures de la réflectance juste au-dessus de la surface de l'eau.

Des mesures semblables ont été réalisées sur le lac Léman en mars 2014 afin d'éva-

luer la variabilité saisonnière de la qualité des eaux du lac et des processus hydrologiques associés. Le volume de données est très important et leur traitement est toujours en cours. Cependant, les résultats préliminaires montrent une cohérence entre les données mesurées au sol et depuis la plateforme aéroportée. De ces résultats encourageants devrait découler l'évaluation prochaine de la qualité des eaux sur des portions étendue des deux lacs, ainsi que l'évaluation de processus locaux à très haute résolution spa-

tiale et temporelle. Au total, les mesures au sol ont été réalisées à 79 points différents sur le lac Léman aux alentours de la Venoge et du Rhône, et 36 points dans le delta de la Selenga sur le Lac Baïkal. Les analyses préliminaires des données hyperspectrales sont présentées dans la Figure 5. En particulier, la figure 5 (a) représente les données hyperspectrales après une analyse en composantes principales (PCA). La figure 5 (b) donne une représentation RGB des données hyperspectrales. La figure 5 (c) présente la distribution des apports de particules du Rhône. Une carte similaire illustre la distribution de chlorophylle, mais l'activité photosynthétique étant négligeable le 7 Mars 2014, elle n'est pas présentée ici.

### Conclusion

L'objectif principal de cette première année du projet Léman-Baïkal était le développement de la plateforme de télédétection et la validation de la chaîne de traitement de données. Cet article présente la méthodologie qui a permis d'obtenir les premiers résultats. On a volé pendant 83 h sur 7700 km sur le Léman et le Baïkal, couvrant une surface de plus de 2000 km<sup>2</sup>. La plateforme montée sur l'ULM a livré plus de 7 Térabits de données, dont notamment 580 000 images et près de 15 millions de lignes balayées par la caméra hyperspectrale. Plus de 100 jeux de mesures au sol ont également été récoltés. Nos résultats prélimi-

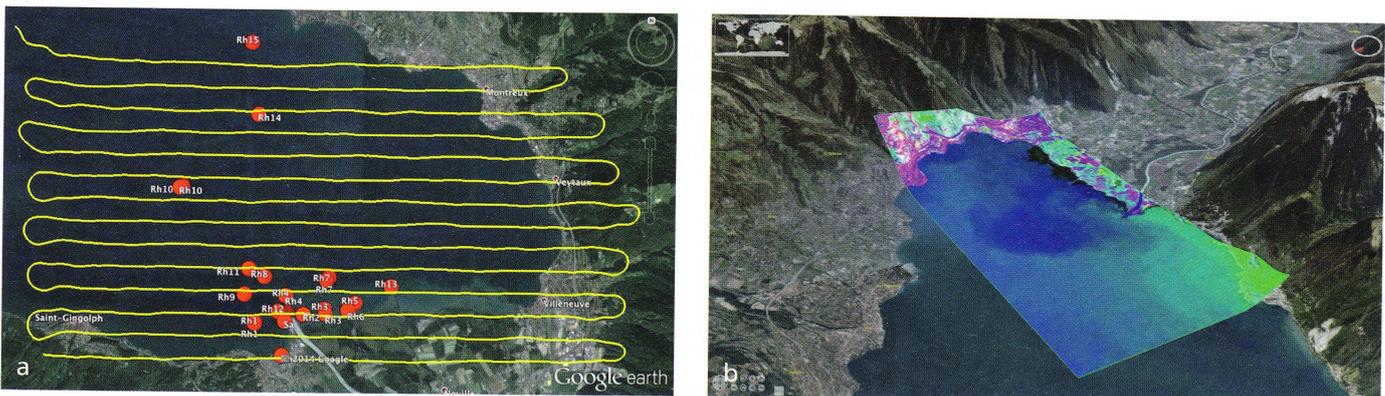


Fig. 4: Acquisition des données collectées le 7 mars 2014 au-dessus de la partie Est du lac Léman (delta du Rhône): (a) trajectoire de vol en jaune et mesures *in situ* en rouge; (b) visualisation 3-D des données hyperspectrales orthorectifiées et géoréférencées.

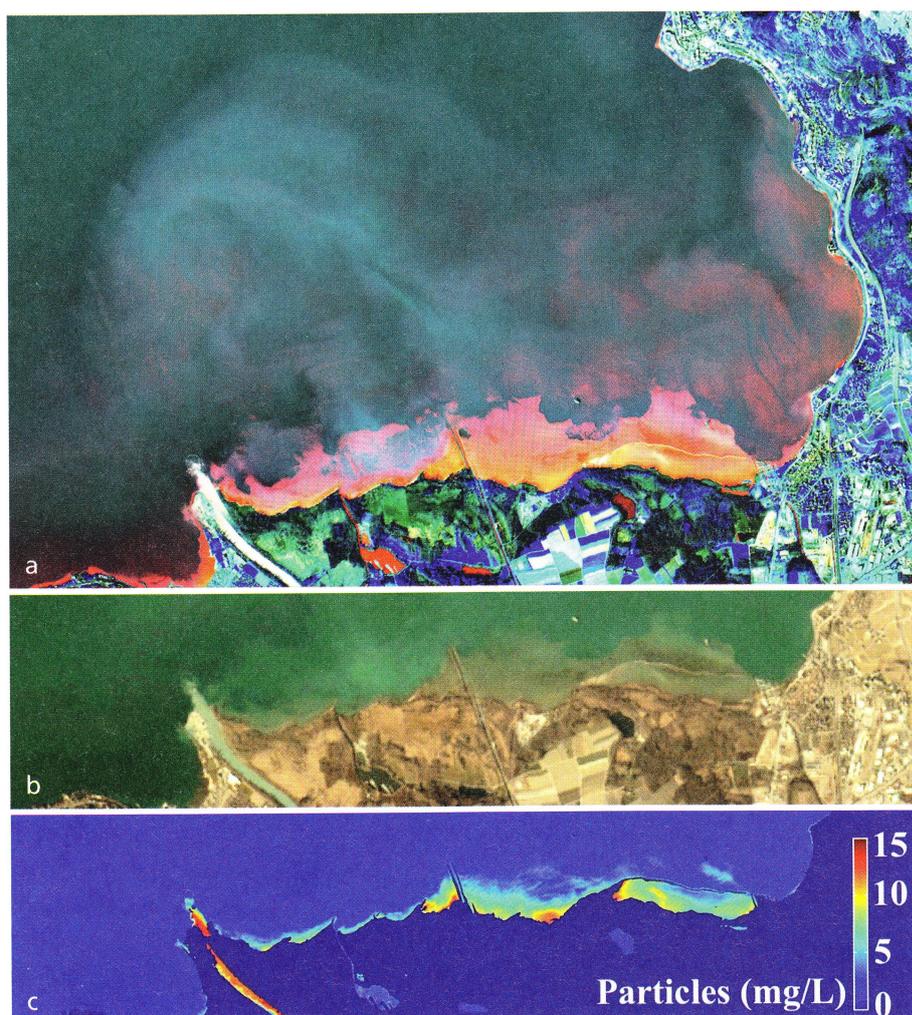


Fig. 5: Images de la partie Est du lac Léman et du Rhône (données du 7 mars 2014) collectées depuis la plateforme de télédétection installée sur l'ULM: (a) analyse en composantes principales (PCA), couleurs artificielles; (b) image RGB; et (c) carte indiquant la concentration en particules, déduite via un réseau de neurones.

naires illustrent l'énorme potentiel de cet équipement. L'essentiel des données est encore en cours de traitement et permettra de mieux comprendre les variations de la qualité des eaux du lac Léman et du lac Baïkal.

### Remerciements

Cette étude est soutenue financièrement et logistiquement par la Fondation pour l'Étude des Eaux du Léman (FEEL), Ferring Pharmaceuticals, le Consulat honoraire de la Fédération de Russie à Lausanne, ainsi que la fondation du Dr. Paulsen et le «Lake Baikal Protection Fund». Les auteurs remercient également D. Tuia et D. Ziegler de l'EPFL, ainsi que A. Ayurzha-

naev, E. Garmaev et A. Tulokhonov de Baikal Institute of Nature Management. Enfin, nous remercions les pilotes français et russes: F. Bernard, J. Couttet, A. Barisevsky, A. Sherbakov, V. Vikharev and N. Belyaev, dont les compétences sont essentielles pour réaliser ces travaux de recherche.

### Bibliographie:

- [1] J.B. Campbell and H.W. Randolph, «Introduction to remote sensing», CRC Press, 2011.
- [2] M.E. Schaepman, S.L. Ustin, A.J. Plaza, T.H. Painter, J. Verrelst, and S. Liang, «Earth system science related imaging spectroscopy – an assessment», Remote Sensing

of Environment, vol. 113, pp. S123–S137, 2009.

- [3] S. Koponen, J. Pulliainen, K. Kallio, and M. Hallikainen, «Lake water quality classification with airborne hyperspectral spectrometer and simulated MERIS data», Remote Sensing of Environment, vol. 79, no. 1, pp. 51–59, 2002.
- [4] A. Lausch, M. Pause, I. Merbach, S. Zacharias, D. Doktor, M. Volk, and R. Seppelt, «A new multiscale approach for monitoring vegetation using remote sensing based indicators in laboratory, field, and landscape», Environmental Monitoring and Assessment, vol. 185, no. 2, pp. 1215–1235, 2013.
- [5] E. Sutyryna, «Assessment of the transformation of landscapes in the catchment area of the lake Baikal using satellite remote sensing data», Privołgskij scientific bulletin, vol. 2, no. 30, pp. 195–197, 2014.
- [6] E. Sutyryna, «Application of satellite data for the study of large inland water bodies (on the example of lakes Baikal and Hovsgol)», Scientific and practical journal, Bulletin of IrGSHA, vol. 57, pp. 57–60, 2013.
- [7] L.M. Korytny, O.I. Bazhenova, G.N. Martianova, and E.A. Ilyicheva, «The influence of climatic change and human activity on erosion processes in sub-arid watersheds in south-eastern Siberia», Hydrological Processes, vol. 17, no. 16, pp. 3181–3193, 2003.
- [8] V. Ivanov, V. Korotaev, and I. Labutina, «Morphology and dynamics of Selenga river delta», Moscow University Bulletin, Geography, vol. 5, no. 4, pp. 48–54, 2007.

Y. Akhtman  
D. Constantin  
M. Rehak  
V. Nouchi  
D. Bouffard  
N. Pasche  
U. Lemmin  
B. Merminod  
École Polytechnique Fédérale  
de Lausanne  
CH-1015 Lausanne  
bertrand.merminod@epfl.ch

G. Shinkareva  
S. Chalov  
Lomonosov Moscow State University  
Moscow, Russian Federation