

## Projet ANR- 09-RISK-003

# CENTURISK

Programme RISKNAT 2009

A	IDENTIFICATION .....	2
B	RESUME CONSOLIDE PUBLIC .....	3
B.1	Instructions pour les résumés consolidés publics .. <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	
B.2	Résumé consolidé public en français .....	3
B.3	Résumé consolidé public en anglais .....	4
C	MEMOIRE SCIENTIFIQUE .....	6
C.1	Résumé du mémoire .....	6
C.2	Enjeux et problématique, état de l'art .....	7
C.3	Approche scientifique et technique .....	7
C.4	Résultats obtenus .....	9
C.5	Exploitation des résultats .....	9
C.6	Discussion .....	10
C.7	Conclusions .....	11
C.8	Références .....	11
D	LISTE DES LIVRABLES .....	12
E	IMPACT DU PROJET .....	12
E.1	Indicateurs d'impact .....	12
E.2	Liste des publications et communications .....	12
E.3	Liste des éléments de valorisation .....	15
E.4	Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD (hors stagiaires) .	15

## A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	CENTURISK
Titre du projet	A novel method to identify the faults prone to break in the coming <u>century</u> , hence posing the most immediate <u>risk</u>
Coordinateur du projet (société/organisme)	MANIGHETTI Isabelle, GEOAZUR, Nice, Sophia Antipolis
Période du projet (date de début – date de fin)	01-01-2010 31-12-2014
Site web du projet, le cas échéant	

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	Mme MANIGHETTI Isabelle
Téléphone	+33 (0)4 83 61 86 35
Adresse électronique	manighetti@geoazur.unice.fr
Date de rédaction	28 février 2015

Si différent du rédacteur, indiquer un contact pour le projet	
Civilité, prénom, nom	
Téléphone	
Adresse électronique	

Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique)	GEOAZUR, responsable I. Manighetti ; ISTERRE, responsable S. Garambois ; IPRA Pau, responsable G. Sénéchal ; Géosciences Montpellier, responsable J. Malavieille ; Cerege, responsable L. Benedetti
---	---

## **B RESUME CONSOLIDE PUBLIC**

### **B.1 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN FRANÇAIS**

#### **CENTURISK, découvrir la mémoire cachée des séismes**

##### *Imager le sous-sol pour y découvrir les traces enfouies des grands séismes passés*

La connaissance des magnitudes des grands séismes passés (préhistoriques, derniers 10000 ans) permet d'anticiper la magnitude maximum des événements à venir, et est donc cruciale pour estimer l'aléa et le risque sismiques. Or notre connaissance des séismes préhistoriques est très limitée car les traces qu'ils ont pu laisser en surface au moment de leur occurrence ont depuis lors été partiellement ou totalement oblitérées par l'érosion. Notre objectif a été de développer une nouvelle méthode de 'paléosismologie', capable d'explorer non pas la surface du sol mais le sous-sol, dans ses 10-20 premiers mètres, de manière non-destructive, afin d'y rechercher et d'y déceler les traces enfouies et donc préservées des grands séismes passés. Si de telles traces peuvent être identifiées, il devient alors possible d'extraire des informations nouvelles sur les grands événements passés, en sus des informations accessibles à la surface du sol. La mesure des traces enfouies peut alors permettre d'estimer la magnitude des grands séismes préhistoriques, tandis que leur datation peut préciser leurs périodes d'occurrence.

##### *Le radar géologique, un outil géophysique pour imager le sous-sol et y déceler les traces enfouies des séismes passés*

La nouvelle méthode de paléosismologie que nous avons développée est basée sur l'utilisation d'un outil d'investigation géophysique, le radar géologique ou GPR, qui, utilisé en acquisition dense et dans des conditions appropriées, permet d'imager finement et de façon non-destructive, le contenu et la structure de la première dizaine de mètres du sol. Les objets géologiques, notamment les variations sédimentaires et les traces de ruptures et de déformations qui ont pu être ensevelis au cours du temps sous une sédimentation postérieure, peuvent ainsi être détectés et imagés précisément. Pour mieux comprendre la nature des objets et traces ainsi détectés dans le sous-sol et leurs relations avec les séismes passés, nous avons analysé conjointement, à très haute résolution (imagerie LiDAR), la morphologie de la surface du sol, et développé une approche expérimentale originale permettant de modéliser et mesurer l'évolution d'un proche sous-sol analogique sous l'effet conjoint de séismes répétés sur une faille, de sédimentation et d'érosion. Nous avons appliqué ces nouvelles approches à cinq des plus grandes failles sismiques au monde : les failles décrochantes de Nouvelle-Zélande.

##### *Résultats majeurs*

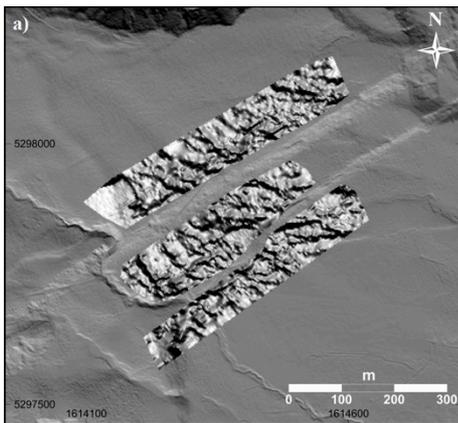
- Développement d'une nouvelle méthode de paléosismologie géophysique, et validation de la méthode
- Développement d'un nouveau protocole expérimental décrivant l'évolution des traces des séismes sous l'effet du cumul des séismes, de l'érosion et de la sédimentation
- Identification et mesure des déplacements produits par les 10-15 derniers forts séismes sur 3 des failles analysées et estimation de leurs magnitudes
- Estimation de la période d'occurrence des séismes identifiés sur l'une des failles
- Mise en évidence d'un comportement sismique dépendant du degré de maturité de la faille rompue

##### *Production scientifique depuis le début du projet*

4 articles publiés dans des revues internationales, un en révision à Journal of Geophysical Research, 3 en cours, plusieurs qui seront soumis dans les prochaines années. Beauprêtre et al., 2012, 2013 sont les articles fondateurs de notre nouvelle méthode de paléosismologie géophysique ; l'article Manighetti et al. en révision à JGR est l'article fondateur des nouvelles approches de paléosismologie morphologique basée sur les nouvelles données LiDAR haute résolution.

12 communications à congrès essentiellement internationaux ; 1 mémoire de thèse ; 5 mémoires de Master; Une dizaine de réunions avec tous les partenaires.

## Illustration



Légende : Chenaux alluviaux (lignes noires au sein des 3 rectangles) enfouis sous la surface du sol (zone gris pâle), révélés et imagés par les acquisitions de radar géologique denses que nous avons effectuées en un site (Terako) de la faille de Hope. Les chenaux enfouis sont invisibles à la surface du sol, qui apparaît extrêmement lisse et essentiellement dénuée de structures en dehors de la zone de failles (deux branches, apparaissant comme des bandes claires orientées NE-SW séparant les zones de chenaux enfouis). La plupart des chenaux enfouis sont décalés par la branche nord de la faille et ces décalages peuvent être mesurés précisément (d'après Beauprêtre, 2012, et Beauprêtre et al., G. J. Int., 2012).

## Informations factuelles

Le projet CENTURISK est un projet de recherche fondamentale coordonné par Isabelle Manighetti, représentant originellement le partenaire LGIT (devenu ISTerre), puis, suite à une mutation de I. Manighetti à Géoazur, le partenaire Géoazur. Il associe quatre autres laboratoires nationaux partenaires, Géosciences Montpellier (représenté par Jacques Malavieille), ISTerre (représenté par Stéphane Garambois), IPRA (représenté par Guy Sénéchal) et Cerege (représenté par Lucilla Benedetti). Deux laboratoires néo-zélandais sont également scientifiquement impliqués, GNS et Université de Canterbury. Le projet a commencé début 2010 et s'est achevé fin 2014 (allocation d'une année supplémentaire par rapport à la durée initialement prévue). Il a bénéficié d'une aide ANR de 500 000 €.

## B.2 RESUME CONSOLIDE PUBLIC EN ANGLAIS

### CENTURISK, finding the buried memory of past earthquakes

#### *Investigating the first 10 meters below ground surface to find the buried traces of earthquakes*

To anticipate the magnitude of the forthcoming large earthquakes, we need to know what were the magnitudes of the large prehistorical events. Yet our present knowledge of the prehistorical earthquakes is very few for the traces those events might have imprinted at the Earth surface have generally been since destroyed by erosion. Our objective was to develop a novel paleoseismological approach, able to explore the first 10 meters of the soil below the ground surface and hence to reveal possible buried and preserved traces of past earthquakes. If such buried traces can be detected, then they might be measured and these measurements might provide useful information to recover the magnitudes of the past events. Dating the buried traces might in turn constrain the occurrence times of the prehistorical earthquakes.

#### *Ground Penetrating Radar, a geophysical instrument to explore the first 10 m of the ground*

The novel paleoseismological approach that we have developed is based on dense Ground Penetrating Radar acquisitions. These dense GPR acquisitions allow investigating at very high resolution (< 1 m) the first 10 meters below the ground surface and imaging the principal reflectors in pseudo-3D. Buried sedimentological features and fault traces can thus be identified and mapped at high resolution. Lateral offset of the sedimentological features can be measured at a precision < 1 m. To better understand the nature and evolution of the detected buried offset markers, we have analyzed the morphology of the ground surface at a similar high resolution (LidAR data), and we have developed a novel analogical experiment dedicated to simulate earthquake fault motions in a context of significant

erosion/sedimentation. We have applied these combined approaches to 5 of the largest seismogenic faults worldwide: the New Zealand strike-slip faults.

### *Major results :*

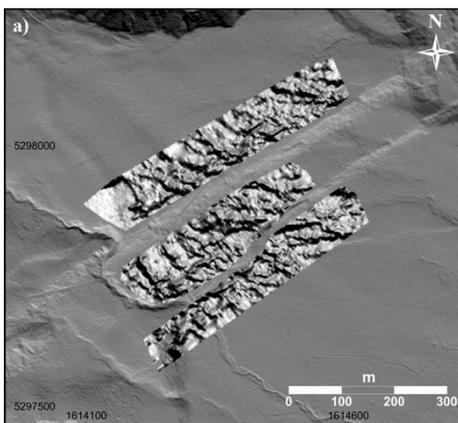
- Development of a novel paleoseismological method, of geophysical type, and validation of that method
- Development of a novel experimental protocol to simulate earthquakes on a strike-slip fault in a context of significant erosion/sedimentation
- Identification and measure of the coseismic offsets produced by the 10-15 most recent prehistorical earthquakes on 3 of the analyzed faults and estimation of their magnitudes
- Estimation of the occurrence times of the prehistorical earthquakes for one of the faults
- Evidence that coseismic slips and recurrences vary with structural maturity of broken faults

### *Scientific production emanating from the project*

4 published international papers plus one in revision at Journal of Geophysical Research; 3 more papers in progress, and more to be published over next few years. Papers by Beauprêtre et al., 2012, 2013 present the core of our novel paleoseismological method; the paper by Manighetti et al. (in revision) discusses how paleoseismology at surface can be revised and refined with the new, high-resolution LiDAR data.

12 international conferences ; 1 PhD; 5 Master degrees ; 10 meetings with all partners.

### *Illustration*



Caption : Buried alluvial channels (black lines within the 3 rectangular zones) revealed and imaged with our novel GPR-based paleoseismological method (from Beauprêtre et al., 2012). Most of the buried channels are not visible at the ground surface. Most are laterally offset by the northern, principal branch of the fault.

### *General information*

CENTURISK is a French scientific proposal developed and led by I. Manighetti, originally at ISTerre French laboratory, then at Géoazur laboratory. Five national research laboratories are involved in the project, GEOAZUR (PI: I. Manighetti), ISTerre (PI: S. Garambois), Geoscience Montpellier (PI: J. Malavielle), IPRA Pau (PI: G. Sénéchal), and Cerege (PI: L. Benedetti). Two New Zealand scientific partners are also involved: GNS and University of Canterbury. The project started at the beginning of 2010 and ended by December 2014. The project has been funded with 500 000 euros.

## C MEMOIRE SCIENTIFIQUE

**Mémoire scientifique confidentiel** : non

*Les figures sont jointes en annexe*

### C.1 RESUME DU MEMOIRE

La connaissance des magnitudes des grands séismes passés (préhistoriques, derniers 10000 ans) permet d'anticiper la magnitude maximum des événements à venir, et est donc fondamentale pour estimer l'aléa et le risque sismiques. Or notre connaissance des séismes préhistoriques est limitée car les traces superficielles que ces séismes ont pu laisser au moment de leur occurrence ont depuis lors été partiellement ou totalement oblitérées par l'érosion. Notre objectif a donc été de développer une nouvelle méthode de 'paléosismologie', capable d'explorer non pas la surface du sol mais le sous-sol, dans ses 10-20 premiers mètres, de manière non-destructive, afin d'y rechercher et d'y déceler les traces enfouies et donc préservées des grands séismes passés. Si de telles traces peuvent être identifiées, il devient alors possible d'extraire des informations nouvelles sur les événements passés, en sus des informations éventuellement accessibles à la surface du sol. Leur mesure peut alors permettre d'estimer la magnitude des grands séismes préhistoriques, tandis que leur datation peut préciser leurs périodes d'occurrence.

Nous avons donc développé une nouvelle méthode de paléosismologie, de nature géophysique. Cette méthode est basée sur l'utilisation d'un outil d'investigation géophysique haute-résolution de sub-surface, le radar géologique ou GPR (Ground Penetrating Radar), qui utilise les ondes électromagnétiques peu atténuées dans les milieux résistifs. Lorsque cet outil est utilisé en acquisition dense (longs profils d'acquisition parallèles aux failles, espacés de quelques mètres, formant une grille pseudo-3D ; Fig. 1) et dans des conditions appropriées, il permet d'imager à haute résolution (< 0.2-1 m sur les lignes d'acquisition) et de façon non-destructive, le contenu et la structure de la première dizaine de mètres du sous-sol. Les objets géologiques, notamment sédimentaires (chenaux alluviaux, bords de terrasses alluviales, corps sédimentaires divers, etc), et les traces de ruptures et de déformations qui ont pu être ensevelis au cours du temps sous une sédimentation postérieure, peuvent ainsi être détectés et imagés précisément. Si ces objets enfouis sont coupés par une faille, il devient alors possible de mesurer les mouvements tectoniques qui les ont affectés. Nous avons appliqué cet outil à cinq des plus grandes failles sismiques au monde : les failles décrochantes de Nouvelle-Zélande. Sur chacune, en plusieurs sites, nous avons effectué des mesures GPR denses (6 mois de missions d'acquisition sur le terrain, total de 15 sites mesurés en GPR pseudo-3D, environ 15 km de profils GPR acquis par site, un total de ~250 km de profils GPR mesurés ; Fig. 2), couplées à des mesures GPS fines de la topographie de la surface du sol. En chaque site minutieusement choisis lors de tests préalables (Fig. 2), les mesures GPR révèlent une multitude de réflecteurs enfouis, souvent bien séparés et continus, distribués à différentes profondeurs dans les 10 premiers mètres du sous-sol (Fig. 1). Pour analyser et notamment pointer ces réflecteurs, nous avons développé un nouveau protocole de traitement grâce au logiciel gratuit Opendtect (Beauprêtre, 2012). Une fois cet outil maîtrisé, nous avons réalisé l'analyse quantitative « complète » des réflecteurs sur deux des sites (Beauprêtre et al., 2012, 2013 ; Fig. 1-3), et une analyse partielle sur 5 autres (Beauprêtre, 2012). Les analyses confirment l'existence de marqueurs morphologiques enfouis dans les 5-10 premiers mètres du sous-sol à chacun des 7 sites considérés. Ces marqueurs sont de surcroît décalés latéralement par la faille, et ces décalages peuvent être mesurés à une résolution métrique. Certains des marqueurs enfouis ont également une trace en surface, mais la plupart n'en ont pas. Nous démontrons donc la validité de notre nouvelle méthode paléosismologique par radar géologique pseudo-3D et confirmons que cette méthode apporte des informations additionnelles aux seules données de surface classiquement analysées. En chaque site, les données acquises en sub-surface nous ont permis d'effectuer plusieurs dizaines de mesures de déplacements. La combinaison de ces mesures à celles de surface a abouti à des jeux de données denses, d'une centaine de mesures par site. Pour analyser ces denses collections de données aux incertitudes variables, nous avons développé des traitements statistiques basés sur les fonctions de probabilité (Fig. 8 et 10).

Pour mieux comprendre la nature des objets et traces détectés dans le sous-sol et leurs relations avec les grands séismes passés, nous avons mené trois autres axes de recherche. Tout d'abord, nous avons acquis une couverture exceptionnelle de données topographiques LiDAR et d'images satellitaires optiques PLEIADES (soutien CNES-CNRS complétant le soutien ANR) sur quatre des failles investiguées par GPR (Fig. 4 à 6). Ces données, d'une résolution jamais atteinte à ce jour, permettent d'analyser la morphologie de surface à un degré de détail inégalé y compris dans des zones végétalisées où aucune observation fine n'a jamais été possible. Les premières analyses de ces données révèlent que certaines des traces des grands séismes passés sont toujours préservées à la surface du sol, sous forme de signatures subtiles (Manighetti et al., en révision à J. Geophys. Res., 2015 ; Fig ; 7). La mesure de ces traces corrobore et complète les mesures effectuées grâce aux données GPR sur des sites ponctuels. Les deux types de mesures –en surface et en sub-surface, se complètent pour fournir une information

inégalée sur les quantités de déplacements produites par les 10-15 derniers grands séismes sur les failles considérées, dont il est alors possible de déduire les magnitudes (Fig. 8 ; Beauprêtre et al., 2012, Manighetti et al., en révision à J. Geophys. Res., 2015).

Parallèlement, nous avons développé un protocole expérimental original permettant de simuler et mesurer l'évolution d'un sous-sol analogique sous l'effet conjoint de séismes expérimentaux répétés sur une faille décrochante, et de processus de sédimentation et d'érosion continus (Fig. 9). Plusieurs expériences ont été réalisées (environ deux mois chacune) sous des conditions différentes (quantités de glissement, nature du sol, degré d'érosion, etc) afin de tester l'impact de ces différents facteurs sur l'évolution des marqueurs témoins des glissements cosismiques (Graveleau et al., 2015). Ce travail fournit pour la première fois un cadre réaliste pour définir et quantifier les incertitudes sur les déplacements tectoniques mesurés dans la morphologie. Ces incertitudes sont larges du à l'érosion des marqueurs au cours du temps, et ces larges incertitudes, rarement prises en compte dans les travaux existants, impactent la précision des estimations des magnitudes des séismes préhistoriques.

Enfin, nous avons échantillonné (réalisation de tranchées de plusieurs mètres de profondeur) et daté (techniques <sup>14</sup>C et OSL sur mono-grain) certains des marqueurs enfouis identifiés dans les données GPR. L'analyse des âges obtenus, en cours, permet d'affiner la mesure des déplacements enfouis, et d'estimer la période d'occurrence des événements identifiés.

L'ensemble des résultats obtenus suggère que le comportement sismique des failles (amplitude des déplacements produits et donc magnitudes, régularité ou non des événements) dépend au moins pour partie de leur degré de maturité structurale (Delor et al., AGU, 2013).

## C.2 ENJEUX ET PROBLEMATIQUE, ETAT DE L'ART

L'évaluation de l'aléa et du risque sismique s'appuie sur notre capacité à anticiper de façon fiable les caractéristiques des événements futurs, notamment en termes de localisation, d'occurrence, de magnitude et d'amplitude des effets produits sur nos milieux physiques et humains. L'une des clés d'une telle anticipation est une bonne connaissance des événements passés 'similaires' s'étant produits dans une région donnée. Or, à l'heure actuelle, nous n'avons pas, ou peu, cette connaissance des grands séismes passés car leurs temps de retour sont très supérieurs (plusieurs centaines, voire milliers d'années) à nos fenêtres d'observation directe, instrumentale (quelques décennies) et historique (quelques centaines d'années en général). La connaissance des forts séismes passés ne peut donc être acquise que par une observation indirecte, basée sur la reconnaissance des traces laissées par ces événements à la surface de la Terre, dans l'enregistrement morphologique et géologique. Or ces traces sont subtiles, et souvent partiellement voire totalement oblitérées par l'érosion postérieure à l'événement considéré. Par conséquent, et bien que de multiples travaux aient été menés ces 30 dernières années pour rechercher dans la morphologie du sol les traces des grands séismes préhistoriques, peu d'études sont parvenues à identifier de telles traces et à en extraire les paramètres nécessaires à la caractérisation quantitative précise des événements : localisation et longueur totale de rupture, variabilité des déplacements produits en surface le long de la rupture, âge de la rupture. Qui plus est, pour déterminer de manière statistiquement fiable comment les forts séismes se sont succédés au cours du temps, il est nécessaire de disposer d'une longue fenêtre d'observation incluant un grand nombre d'événements sur une même faille.

Un enjeu critique dans le domaine des aléas et risques sismiques est ainsi de développer de nouvelles méthodes paléosismologiques qui permettent à la fois d'acquérir de longs 'enregistrements géologiques et morphologiques' des séismes passés sur une faille donnée (plusieurs 1000-10000 ans), et de restituer précisément, pour chaque événement identifié, ses paramètres majeurs: longueur de rupture, âge, variabilité des déplacements produits le long de la rupture.

Ceci a été l'objectif du projet multidisciplinaire CENTURISK, qui s'est inscrit dans une démarche que nous menons depuis plusieurs années pour développer de nouvelles méthodes paléosismologiques (voir projet ANR antérieur, QUAKonSCARPS, porté par I. Manighetti).

## C.3 APPROCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Pour atteindre l'objectif fixé, nous avons suivi quatre axes de travail, le premier formant le cœur du projet :

**1) Développement d'une nouvelle méthode de paléosismologie, de nature géophysique, et diffusion du protocole à la communauté.** Cette méthode est basée sur l'utilisation d'un outil d'investigation géophysique haute-résolution de sub-surface, le radar géologique ou GPR (Ground Penetrating Radar). Cet outil est utilisé en acquisition dense, c'est-à-dire qu'en chaque site, 50 à 100 profils longs de 200-500 m sont acquis, espacés de quelques mètres, parallèlement et de part et d'autre de la faille considérée, de sorte à former une grille serrée

couvrant la faille sur 200-500 m de long et 100-200 m de large (Fig. 1 et 3). Des mesures des vitesses de propagation électromagnétique dans les matériaux considérés sont également réalisées en plusieurs endroits de la zone investiguée par acquisitions en « Point Milieu Commun » (CMP) (Beauprêtre, 2012) permettant notamment la conversion des temps de propagation en profondeur. La topographie de la surface est mesurée précisément par GPS cinématique, fournissant un modèle numérique de terrain de précision métrique. Une à deux semaines d'acquisition sont nécessaires par site. De retour au laboratoire, chaque profil GPR est traité individuellement avec des protocoles relativement classiques (filtrage, corrections topographiques, migration, recherche des gains appropriés pour une visualisation optimale des réflecteurs, etc), puis analysé manuellement pour la recherche et la reconnaissance des réflecteurs principaux. Pour analyser l'ensemble des profils conjointement et construire les images pseudo-3D des réflecteurs principaux à travers la zone étudiée, nous avons développé un nouveau protocole de pointé de réflecteurs pour le GPR sous Opendtect (Beauprêtre, 2012). Cet outil permet de pointer précisément et semi-automatiquement les réflecteurs ayant les mêmes propriétés électro-magnétiques dans différents profils (un contrôle visuel valide cette opération) et de cartographier conjointement ces réflecteurs « identiques ». Il en résulte une image pseudo-3D restituant la topographie des réflecteurs majeurs présents sur toute la zone. Lorsque ces réflecteurs sont des surfaces alluviales (de remplissage ou d'érosion), comme ce fut souvent le cas, leur morphologie révèle des traces (ex : incision par des chenaux) que l'on peut identifier et décrire à une résolution inférieure au mètre (Fig. 1 et 3). Si ces traces sont décalées par la faille, ces décalages peuvent alors être mesurés précisément. Nous avons fourni les protocoles d'analyse dans les deux publications qui assoient la base de nos développements méthodologiques (Beauprêtre et al., 2012 ; Beauprêtre et al., 2013).

**2) Exploitation des nouvelles données aérospatiales LiDAR et PLEIADES pour affiner le potentiel des méthodes paléosismologiques classiques basées sur l'analyse de la morphologie de surface.** Jusqu'à récemment, pour analyser la morphologie et y rechercher les traces des séismes passés, la communauté disposait essentiellement de trois types de données : i) l'imagerie satellitaire optique, principalement LANDSAT et SPOT, ayant l'avantage de couvrir de vastes zones et d'être accessibles à coûts nuls ou modérés mais le désavantage d'une résolution modeste (15 m pour Landsat, 2.5 m pour Spot 5) et d'une acquisition optique (morphologie masquée par les nuages, la neige, la végétation) ; ii) la topographie SRTM, ASTER et SPOT, gratuites ou à faible coût, ayant l'avantage de couvrir de vastes zones mais le désavantage d'une faible résolution (90 m pour SRTM, 30 m pour Aster et 20 m pour Spot) ; iii) des observations et mesures de terrain généralement précises (i.e., résolution métrique) mais ponctuelles et souvent très coûteuses. Sur la base de ces données, rares sont les études qui ont permis de déterminer les déplacements sismiques passés et d'estimer les magnitudes des grands séismes préhistoriques. Au cours de notre projet, nous avons bénéficié d'une opportunité nouvelle: l'explosion de l'imagerie LiDAR et PLEIADES. Une société néo-zélandaise venait de voir le jour qui proposait l'acquisition et le pré-traitement de données LiDAR. Nous en avons profité pour acquérir des données LiDAR sur deux des failles étudiées en GPR (Hope et Wairarapa). Les données LiDAR permettent d'analyser la topographie et la morphologie à la plus haute résolution possible actuellement (< 1 m), y compris dans les zones végétalisées. Elles sont toutefois relativement coûteuses. Parallèlement, la constellation PLEIADES a fourni ses premières données durant les années de notre projet, et nous avons donc pu acquérir une couverture dense d'images Pléiades en stéréo et tri-stéréo sur deux autres des failles du projet (acquisition sur soutien complémentaire du CNES-CNRS). Ces images, acquises en 2014, vont nous permettre de construire des MNT à haute résolution (< 2-3 m selon les zones) sur lesquels les traces morphologiques pourront être mesurées finement. L'acquisition de ces nouvelles données aérospatiales est un énorme atout pour notre projet car nous pourrions analyser la morphologie du sol à la même précision que les données GPR, de sorte que les signatures de surface et de sub-surface pourront être comparées. Nos premières analyses des données LiDAR démontrent que la surface du sol garde en certains endroits l'empreinte de certains des grands séismes passés (parfois jusqu'à 10-15), et que ces informations subtiles sont complémentaires de celles révélées en sub-surface par les données GPR (Manighetti et al., en révision à J. Geophys. Res., 2015 ; Fig. 8).

3) Parallèlement, pour mieux comprendre la nature des objets et traces détectés dans le sous-sol et mieux appréhender les incertitudes sur les déplacements mesurés, **nous avons développé une approche expérimentale originale qui permet d'étudier la dynamique des marqueurs morphostructuraux qui se développent et évoluent sous les effets conjugués du couplage entre déformation (séismes répétés) et processus de surface (érosion-sédimentation)** (Fig. 9). Plusieurs expériences ont été réalisées (environ 2 mois chacune) sous des conditions différentes (quantités de glissement sur la faille, morphologie initiale des bassins versants, vitesses d'érosion, etc) afin de tester l'impact de ces différents facteurs sur l'évolution des marqueurs témoins des glissements cosismiques (Graveleau et al., 2015). Ce travail fournit pour la première fois un cadre réaliste pour définir et quantifier les incertitudes sur les déplacements tectoniques mesurés dans la morphologie. Ces incertitudes liées à l'altération rapide des marqueurs par l'érosion sont larges et impactent celles affectant les estimations des magnitudes des séismes préhistoriques.

4) Enfin, **nous avons réalisé une dizaine de tranchées de plusieurs mètres de profondeur de part et d'autre de la faille de Hope au site de Terako afin d'échantillonner et dater** (14C, OSL sur mono-grain) **certaines des marqueurs enfouis décalés identifiés dans les données GPR** (Beauprêtre et al., 2012).

L'analyse des âges obtenus, en cours, permet d'ores et déjà d'affiner la mesure des déplacements enfouis (car certains appariements se révèlent erronés tandis que d'autres sont confirmés), et d'estimer la période d'occurrence de certains groupes d'événements identifiés.

**L'ensemble des résultats est examiné à la lumière des propriétés intrinsèques des failles rompues**, en particulier leur degré de maturité structurale (e.g., Manighetti et al., 2007) et leur segmentation latérale (Manighetti et al., 2009, 2015).

## C.4 RESULTATS OBTENUS

La version originale du projet annonçait trois « livrables » principaux :

1- « Development of a novel 'technical package' (from acquisition to processing of the data) allowing, at moderate cost and in a non-invasive manner, to explore the subsurface (first tens meters of the ground) at high resolution (0.1-10 m) and recover the fine fault and sedimentary architecture. [...] Once operational, make the package available to the community” → **Nous avons atteint ce premier objectif**, puisque nous avons développé et validé une nouvelle méthode de paléosismologie géophysique, non-destructive, de faible coût et de haute résolution. Nous avons mis les protocoles de cette nouvelle méthode en accès à la communauté via leur publication et leur diffusion à des congrès nationaux et internationaux. Notre méthode est prête à être utilisée dans d'autres contextes (failles décrochantes, normales, ou inverses à déplacements cosismiques > 1 m)

2- « Development of a novel analogue protocole allowing the space-time evolution of the sub-surface tectono-sedimentary architecture that results from repeated faulting events, to be described and measured, hence understood, in detail” → **Nous avons atteint ce deuxième objectif**, puisque nous avons développé un protocole expérimental qui permet de simuler des séismes sur une faille décrochante soumise à un contexte d'érosion et sédimentation évolutif dans le temps et l'espace. Les expériences reproduisent ainsi des conditions semblables aux conditions observées sur les failles de Nouvelle-Zélande. La rupture du contrat de thèse de M. Chatton (voir détails plus loin) a ralenti ce volet du travail. Mais le protocole est en place, la plupart des expériences réalisées, et nous allons donc pouvoir exploiter les données (publications prévues en 2016).

3- “Production of a catalog describing the timing, extent, entire surface slip-length profile, and magnitude of the last 10 and possibly more large earthquakes to have occurred on some of the most threatening faults worldwide” → **Nous avons partiellement atteint ce troisième objectif**; partiellement car : i) nous n'avons eu le temps d'exploiter qu'une partie de l'immense quantité des données GPR, LiDAR et Pléiades acquises au cours du projet ; ii) nous avons eu des difficultés pour effectuer le volet datation du travail, les premières datations n'ayant pu être réalisées qu'à la fin 2014. Ainsi, nous n'avons pas encore l'ensemble des contraintes temporelles dont nous avons besoin pour construire le catalogue proposé. Toutefois, nous en avons déjà établi une partie significative. Les figures 8 et 10 présentent certains des résultats qui alimentent ce catalogue. En particulier: i) nous avons identifié 6 à 15 (voire une trentaine sur la faille de Hope) forts séismes préhistoriques sur les failles de Hope, Wellington et Wairarapa ; ii) nous montrons que ces forts séismes ont produit des déplacements cosismiques d'amplitude semblable sur la faille de Hope (environ 4 m) et sur la faille de Wellington (3-5 m). Rapportées aux longueurs de rupture probables d'après la segmentation de ces failles, nous estimons les magnitudes ( $M_w$ ) de ces séismes « semblables » de l'ordre de 7.4 sur la faille de Hope et 7.2-7.4 sur la faille de Wellington ; iii) nous montrons que les forts séismes préhistoriques sur la faille de Wairarapa ont au contraire produit des déplacements cosismiques d'amplitude différente, variant de  $7 \text{ à } 13 \pm 3 \text{ m}$ . Rapportés aux longueurs de rupture probables d'après la segmentation de cette faille, nous estimons que ces forts séismes passés ont eu des magnitudes  $M_w$  de l'ordre de 7.6-7.8 ; iv) confrontés aux propriétés intrinsèques des failles rompues (voir Manighetti et al., 2007 ; Fig. 11), ces résultats suggèrent que la faille mature de Wellington et la faille de Hope de maturité intermédiaire produisent des séismes moins énergétiques (plus faibles déplacements versus longueur et donc plus faibles chutes de contrainte) que la faille immature de Wairarapa. Combinées à nos datations récentes, les quelques données temporelles disponibles dans la littérature suggèrent que les forts séismes se sont suivis de façon relativement régulière dans le temps sur la faille mature de Wellington, et se sont au contraire produits en clusters sur les failles intermédiaires et immatures de Hope et Wairarapa, respectivement. Les prochaines datations que nous espérons réaliser avec l'aide d'autres sources de financement seront cruciales pour valider ces inférences et affiner les catalogues.

## C.5 EXPLOITATION DES RESULTATS

Les premiers résultats ont été exploités et valorisés sous forme de publications à fort impact international (voir section E.2). De nombreuses analyses sont encore en cours, qui donneront lieu à plusieurs publications dans les 1-3 années à venir (voir section E.2). Il est important de noter que, bien que le nombre de publications déjà

réalisées est modeste, les deux premiers articles (Beauprêtre et al., 2012, 2013) sont fondamentaux et de grande importance car ils assoient les fondements de la nouvelle méthode paléosismologique que nous avons développée dans ce projet. Un troisième article, actuellement en révision, est également fondamental car il présente la toute première démonstration que, lorsqu'elle est analysée à très haute résolution –ce qui n'était pas possible jusqu'alors, la morphologie de surface peut révéler des témoins subtils des grands séismes passés, fournissant alors des informations complémentaires aux données de sub-surface. Parce que cette démonstration bouscule les approches classiques et remet en cause certains des résultats obtenus dans des travaux antérieurs, notre publication fait l'objet de débats qui occasionnent un certain retard à sa parution.

Bien que le projet soit achevé, et avec lui ses financements, nous disposons d'une quantité importante et unique de données que nous voulons exploiter et valoriser. Nous allons: 1) Analyser les données GPR pseudo-3D acquises en 8 sites non encore exploités (thèse envisagée pour 2016). 2) Développer un code de mesures des déplacements en 3D (reconstitution 3D des objets décalés), adapté aux données LiDAR et MNT Pléiades, et effectuer ces mesures 3D sur les failles de Hope et Wairarapa (stage de M2R en cours à Géoazur ; Thèse proposée pour 2015, Géoazur). 3) Développer un protocole de construction de MNTs haute résolution à partir d'images Pléiades en stéréo et tri-stéréo (Thèse proposée pour 2015, Géoazur), et les exploiter pour restituer les déplacements cosismiques. 4) Exploiter les données d'expériences analogiques acquises dans le cadre de la thèse de M. Chatton. Nous quantifierons en particulier les sources et amplitudes des incertitudes entre déplacements initialement imposés en entrée du modèle et déplacements mesurés au terme d'une certaine durée d'évolution tectono-sédimentaire. 5) poursuivre le travail de datation des marqueurs enfouis identifiés. L'ensemble de ce travail s'étalera sur les 2-3 prochaines années, et aboutira à la construction finale des catalogues de forts séismes passés proposés dans le projet originel.

## C.6 DISCUSSION

Nous voudrions ici faire état des succès et des difficultés que nous avons rencontrés au cours de notre projet CENTURISK.

**Notre projet est principalement un succès**, en particulier sur les points suivants :

- Nous avons démontré que la nouvelle méthode de paléosismologie géophysique que nous proposons était fonctionnelle, et qu'il existe bien une mémoire cachée des grands séismes enfouie dans les premiers mètres du sol. Cette méthode va désormais pouvoir être utilisée sur d'autres failles au monde.
- Nous avons acquis une quantité phénoménale de données GPR, inégalée au monde, qui nous offre des perspectives de recherche extrêmement riches dans les années à venir.
- Nous avons acquis une quantité considérable de données aérospatiales LiDAR et PLEIADES. Ces données sont extrêmement récentes et il est rare d'en détenir de telles collections. Ceci nous ouvre des perspectives de recherche extrêmement riches dans les années à venir.
- Nous avons développé un protocole expérimental unique qui va pouvoir être utilisé pour apporter des contraintes quantitatives aux études morphologiques. Rares sont en effet les travaux qui discutent l'évolution « active » des marqueurs utilisés pour mesurer les déplacements sur les failles. En modifiant les marqueurs, cette évolution entraîne des mesures altérées par rapport aux déplacements originels. Les résultats que nous publierons dans la prochaine année seront donc extrêmement importants car ils remettront en cause un grand nombre de travaux antérieurs.
- Nous avons réussi à échantillonner et dater certains des marqueurs enfouis identifiés, ce qui était un challenge à la fois technique (tranchées et échantillonnages ultra-ciblés et nécessité de techniques de datation OSL innovantes) et scientifique. Nous allons publier ces résultats dans les meilleures revues.
- Nos premiers résultats nous permettent d'estimer les magnitudes des 6-15 derniers grands séismes sur 3 failles distinctes, et donc d'anticiper les gammes de magnitudes des événements à venir sur ces failles. Nous avons besoin d'achever le volet datations du travail pour estimer les temps d'occurrence des séismes identifiés mais il semble d'emblée que, au moins sur la faille de Hope, les forts séismes passés se sont produits en clusters séparés par des phases plus quiescentes. Il semble que nous soyons actuellement au cœur de l'un de ces clusters, ce qui, si cette hypothèse est exacte, suggère qu'un fort événement peut se produire sur la faille de Hope dans le siècle à venir.
- Nous avons formé une étudiante en thèse, Sophie Beauprêtre (contrat doctoral Ministériel ISTERre et Géoazur), aux métiers de la recherche. Elle a brillamment soutenu sa thèse en 2012 sur le projet Centurisk, qu'elle a valorisée en trouvant un emploi permanent dans une société privée de géophysique (Geolink).

### **Nous avons cependant rencontré certaines difficultés au cours du projet :**

- Nous avons connu deux échecs dans nos recrutements d'étudiants en thèse : Marina Chatton, recrutée sur un contrat doctoral financé par le projet Centurisk (partenaire Montpellier), a abandonné son travail de thèse au terme de la troisième année, sans avoir exploité ni valorisé les données acquises. Plus récemment, Elodie Delor, recrutée sur un contrat doctoral Ministériel (partenaires Géoazur et ISTerre), a abandonné son travail de thèse au terme de la première année, sans avoir exploité ni valorisé les premières données acquises. Nous ne comprenons pas les raisons de ces abandons mais constatons que ce type de situation se généralise dans notre communauté nationale. Ces abandons ont été évidemment préjudiciables à notre projet, dont ils ont ralenti voire stoppé certaines phases de travail cruciales.
- La très grande masse de données GPR et aérospatiales que nous avons acquises au cours du projet est un point fort certain (qui a demandé un très fort investissement humain), mais en même temps, cette masse considérable de données demande un temps d'exploitation qui dépasse largement la durée du projet CENTURISK. Ceci explique que nous n'avons pas pu achever la totalité de notre projet. Mais nous nous engageons à le faire dans les quelques années à venir, dans le cadre, nous l'espérons, de nouvelles thèses.

## **C.7 CONCLUSIONS**

Nous avons mené ce projet en bonne collaboration, grâce à un nombre raisonnable de partenaires et membres du projet, et à leur complémentarité scientifique. Les financements significatifs accordés par le programme RISKMAT de l'ANR nous ont permis de mettre au point une nouvelle méthode de paléosismologie de nature géophysique, mais également de revisiter les méthodes classiques de mesures en surface par prise en compte des nouvelles données aérospatiales LiDAR et PLEIADES en pleine explosion ces quelques dernières années. Plus d'une dizaine de publications d'impact international émaneront de ce projet, qui feront date dans le domaine de la paléosismologie et de l'estimation de l'aléa sismique. Enfin, ce projet a permis de former une étudiante en thèse aux métiers de la recherche, et la qualité de notre formation a été attestée par son recrutement immédiat à un poste permanent en entreprise. CENTURISK est donc un succès que nous devons au soutien de l'ANR mais également du CNES-CNRS (soutien complémentaire pour l'achat des images PLEIADES), et à la qualité de notre travail scientifique et technique collaboratif.

## **C.8 REFERENCES**

Les références sont données en section E2

## D LISTE DES LIVRABLES

Date de livraison	N°	Titre	Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires (souligner le responsable)	Commentaires

## E IMPACT DU PROJET

### E.1 INDICATEURS D'IMPACT

**Nombre de publications et de communications (à détailler en E.2)**

		Publications multipartenaires	Publications monopartenaires
International	Revue à comité de lecture	5	
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)	9	
France	Revue à comité de lecture		
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)	3	
Actions de diffusion	Articles vulgarisation		
	Conférences vulgarisation		
	Autres	3 articles internationaux en préparation	

**Autres valorisations scientifiques (à détailler en E.3)**

	Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables)
Brevets internationaux obtenus	
Brevet international en cours d'obtention	
Brevets nationaux obtenus	
Brevet nationaux en cours d'obtention	
Licences d'exploitation (obtention / cession)	
Créations d'entreprises ou essaimage	
Nouveaux projets collaboratifs	
Colloques scientifiques	
Autres (préciser)	

### E.2 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

*Les noms des étudiants impliqués dans le projet sont soulignés, et leur rôle explicité à la fin de la liste de publications et communications.*

### *Articles publiés (rang A):*

- Manighetti I., Perrin C., Dominguez S., Garambois S., Gaudemer Y., Delor E., Vitard C., Beauprêtre S., and Malavieille J., Examining the potential of the morphology to record pre-historical earthquake slips in a high alluvial dynamics context; insight from LiDAR data analysis of Eastern Hope fault, New Zealand, in review in *J. Geophys. Res.*, **2015**
- Graveleau F., Strak V., Dominguez S., Malavieille J., Chatton M., Manighetti I., and Petit C., Experimental modelling of tectonics – erosion – sedimentation interactions in compressional, extensional and strike-slip settings, *Geomorphology*, in press, **2015**.
- Graveleau, F., Strak, V., Dominguez, S., Malavieille, J., Chatton, M., Manighetti, I., Petit C., "Experimental modelling of deformation-erosion-sedimentation interactions in compressional, extensional and strike-slip settings ». In Elger, K; Haug, Ø. T.; Ritter, M. C. (Eds), (2014): Proceedings of GeoMod2014 – Modelling in Geosciences: Programme and Extended Abstracts 31 August–5 September 2014, GeoMod2014 – Modelling in Geosciences (Potsdam 2014), Potsdam: GFZ German Research Centre for Geosciences. DOI: <http://doi.org/10.2312/GFZ.geomod.2014.001>, **2014**.
- Beauprêtre S., I. Manighetti, S. Garambois, J. Malavieille, and S. Dominguez, Stratigraphic architecture and fault offsets of alluvial terraces at Te Marua, Wellington fault, New Zealand, revealed by pseudo-3D GPR investigation, *J. Geophys. Res.*, VOL. 118, 1–22, doi:10.1002/jgrb.50317, **2013**.
- Beauprêtre S., Garambois S., Manighetti I., Malavieille J., Sénéchal G., Chatton M., Davies T., Larroque C., Rousset D., Cotte N., and Romano C., Finding the buried record of past earthquakes with GPR-based paleoseismology : a case study on the Hope fault, New Zealand, vol. 189, n°1, pp. 73-100, doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05366.x, *Geophys. J. Int.*, **2012**.

### *Articles en cours:*

- Gaudemer Y., Manighetti I., Suel E., Matteo L., Dominguez S., Malavieille J., and Garambois S., A new code to measure fault displacements in 3D in LiDAR and other topographic data, to be submitted to *Earth and Pl. Sci. Lett.*, 2015.
- Manighetti I., Reimann T., Malavieille J., Garambois S., and Dominguez S., 14C and OSL dating of buried offset channels at Terako, New Zealand; implications on Hope fault slip rate and paleoearthquake history, to be submitted to *J. Geophys. Res.*, 2016
- Manighetti I., Dominguez S., Malavieille J., Garambois S., and Gaudemer Y., Paleoseismological evidence for large, high stress drop earthquakes on the Wairarapa fault, New Zealand, to be submitted to *J. Geophys. Res.*, 2016

### *Communications:*

- Beauprêtre S., Garambois, S., Manighetti, I., Malavieille, J. and Langridge, R., Searching for the buried memory of past strong earthquakes on strike-slip and normal faults using GPR data. World-leading workshop in GPR, Lecce (Italy), June 2010.
- Beauprêtre S., Manighetti I., Garambois S., Malavieille J., Sénéchal G., Chatton M., Finding the buried record of past earthquakes with GPR-based paleoseismology, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 14, EGU2012-9184, 2012, EGU General Assembly 2012.
- Beauprêtre S., Manighetti I., Garambois S., Malavieille J., Chatton M., Dominguez, S. Revisiting the use of offset surface features to recover fault slip histories: insights from pseudo-3D GPR imaging of offset alluvial terraces at Te Marua, Wellington fault, New Zealand, AGU Fall meeting, San Francisco, USA, 2012.
- Chatton M., Dominguez, S., Malavieille, J., Manighetti, I., Garambois, S., Beauprêtre S., Etude de l'évolution des marqueurs morphologiques, structuraux et sédimentaires associés aux grands décrochements actifs de Nouvelle Zélande: Analyse morphostructurale, modélisation expérimentale et apports pour la paléosismologie. Symposium "Quoi de neuf en tectonique" en hommage à Maurice Mattauer, Montpellier, 9-10 décembre 2010.
- Chatton M., Malavieille, J., S. Dominguez, I. Manighetti, C. Romano, S. Beauprêtre, S. Garambois, C. Larroque, Interaction between slip events, erosion and sedimentation along an active strike-slip fault: Insights from analog models. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 14, EGU2012-9545-1, 2012, EGU General Assembly 2012.

- Delor E., Manighetti I., Garambois S., and Beauprêtre S., Repetition of large stress drop earthquakes on Wairarapa fault, New Zealand, revealed by LiDAR data, AGU Fall meeting, San Francisco, Dec. 2013.
- Delor E., Garambois S., Manighetti I., Dominguez S., Malavieille J., Larroque C., Hollingsworth J., Lague D., 2014, Analyse multi-méthodes de la déformation associée aux grands décrochements de NZ et quantification des déplacements cumulés et cosismiques. 24e Réunion des Sciences de la Terre, Pau, 27 au 31 Octobre 2014, France, 2014.
- Ferdinand, A., S. Dominguez, J. Malavieille & I. Manighetti, 2014, Evolution morpho-tectonique de marqueurs décalés par de grands décrochements ; analyse de données expérimentales et application à la Nouvelle-Zélande. 24e Réunion des Sciences de la Terre, Pau, 27 au 31 Octobre 2014, France, 2014.
- Garambois S., I. Manighetti, J. Malavieille, R. Langridge, and T. Davis., Searching for the buried memory of past strong earthquakes on strike-slip faults, AGU Fall meeting, 14-18 December, San Francisco, USA, 2009.
- Graveleau, F., Strak, V., Dominguez, S., Malavieille, J., Chatton, M., Manighetti, I, Petit C., Tectonic Geomorphology in the Laboratory: Evolution of landscape along an active thrust, normal and strike-slip fault. Geophysical Research Abstracts, Vol. 17, EGU2015-14825, Vienna, Austria, 2015.
- Manighetti I., Beauprêtre S., Garambois S., Malavieille J., Sénéchal G., Chatton M., Finding the buried memory of past earthquakes with geophysical, GPR-based paleoseismology, AGU Fall meeting, San Francisco, USA, 2011.
- Malavieille, J., Dominguez, S., Manighetti, I., Garambois, S., Romano, C., Chatton, M., Ferdinand, A., 2014, Modeling the interaction between slip events, erosion and sedimentation along an active strike-slip fault: insights from morphotectonic experiments. GEEA 2014, Geodynamics and Environment in East Asia, Hualien, Taiwan, 12-18 November 2014.

### *Mémoires (Masters, thèses)*

- BEAUPRETRE Sophie, Développement d'une approche de paléosismologie géophysique par imagerie géoradar ; application aux failles décrochantes actives de Nouvelle-Zélande, Thèse Ministère, ISTERre (responsables : S. Garambois et I. Manighetti), 2012.
- CHATTON Marina, Incertitudes sur la mesure des déplacements cumulés sur les failles décrochantes actives en contexte de forte sédimentation/érosion ; approche analogique ; Thèse ANR, Université Montpellier II (responsables : J. Malavieille et I. Manighetti), début automne 2010, abandon fin 2013.
- DELOR Elodie, Identification des grands séismes préhistoriques sur la faille de Wairarapa, Nouvelle-Zélande, par analyse de données LiDAR et GPR, Master 2 recherche, Université de Nice (responsables : I. Manighetti et S. Garambois), 2013
- DELOR Elodie, 2013-2014 : Détermination de l'histoire sismique des grandes failles décrochantes de Nouvelle-Zélande, par analyse couplée de données géophysiques GPR de sub-surface, de données d'imagerie LiDAR de surface, et de données de datations, Thèse Ministère Géoazur et ISTERre (responsables : I. Manighetti et S. Garambois), début automne 2013, abandon fin 2014.
- FERDINAND Adélaïde. Genèse et évolution des marqueurs morphostructuraux associés aux grandes failles sismiques décrochantes : Approche expérimentale et cas d'étude en Nouvelle-Zélande. Mémoire de Master 2, Encadrement, J. Malavieille et S. Dominguez, 2014.
- MATTEO Lionel, Test d'un protocole d'analyse des données LiDAR en vue de la mesure en 3D des déplacements cumulés sur les failles sismogènes, rapport de M1, Géoazur (responsable : I. Manighetti), 2015.
- PERRIN Clément, Relations entre propriétés des failles et propriétés des forts séismes, Thèse Ministère, Université de Nice (responsable : I. Manighetti), 2014.
- SUEL Emmanuelle, Analyse de données LiDAR et d'images satellitaires Pléiades en vue de la mesure en 3D des déplacements cumulés sur les failles sismogènes, rapport de M2R, Géoazur (responsable I. Manighetti), 2015.
- VITARD Clément, Quantification des déplacements cumulés sur la faille de Hope, Nouvelle-Zélande par analyse de données satellitaires et LiDAR ; implications sur l'estimation de l'aléa sismique, rapport de M1, Géoazur (responsable : I. Manighetti), 2012.

### *Rôle des étudiants impliqués dans les publications et congrès :*

Sophie BEAUPRETE : Thèse Ministère sur le développement de la nouvelle méthode de paléosismologie (2010-2012, co-direction : S. Garambois et I. Manighetti)

Marina CHATTON : Thèse sur financement ANR CENTURISK, sur la partie analogique du travail, démarrée en octobre 2010 et abandonnée en novembre 2013 (co-direction : J. Malavieille et I. Manighetti).

Elodie DELOR : Stage de M2R sur l'analyse des données LiDAR et GPR de Wairarapa (2013, co-direction : I. Manighetti et S. Garambois) ; Thèse Ministère sur le projet CENTURISK, démarrée en octobre 2013 et abandonnée en novembre 2014 (co-direction : I. Manighetti et S. Garambois).

Lionel MATTEO : Stage de M1 sur le développement d'un code pour la mesure en pseudo-3D des déplacements sur les failles, à partir des données LiDAR du projet (2015, encadrement : I. Manighetti)

Clément PERRIN : participation à l'acquisition des données GPR sur le terrain (2012) ; analyse des données LiDAR au cours de sa thèse (2014), qui portait sur un autre sujet, toutefois en lien thématique.

Emmanuelle SUEL : Stage de M2R sur le développement d'un code de mesures en 3D des déplacements sur les failles, à partir des données LiDAR et PLEIADES du projet (2015, co-direction : I. Manighetti et Y. Gaudemer)

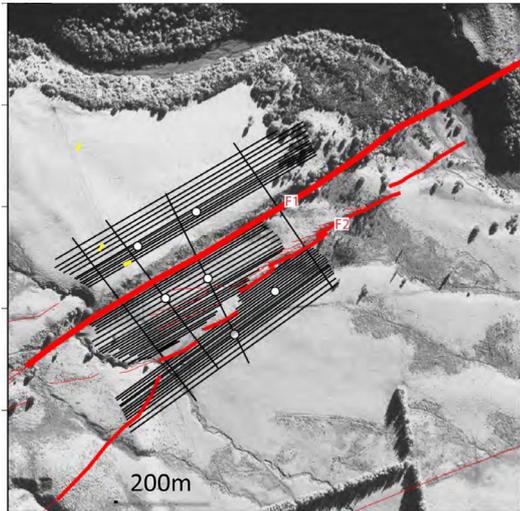
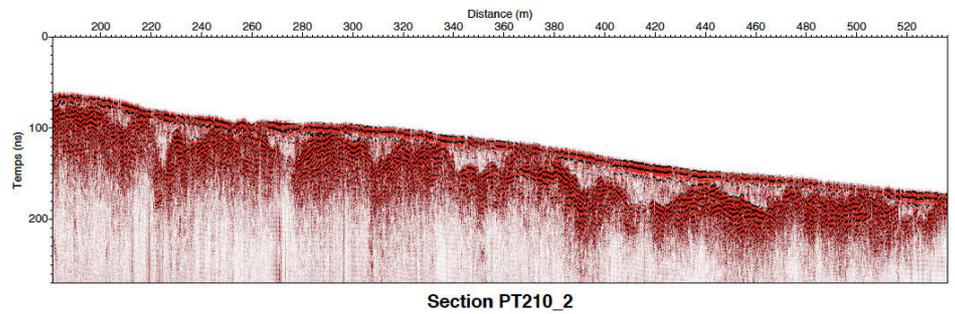
Clément VITARD : Stage de M1 sur l'analyse des données LiDAR de la faille de Hope (2012, direction : I. Manighetti).

### **E.3 LISTE DES ELEMENTS DE VALORISATION**

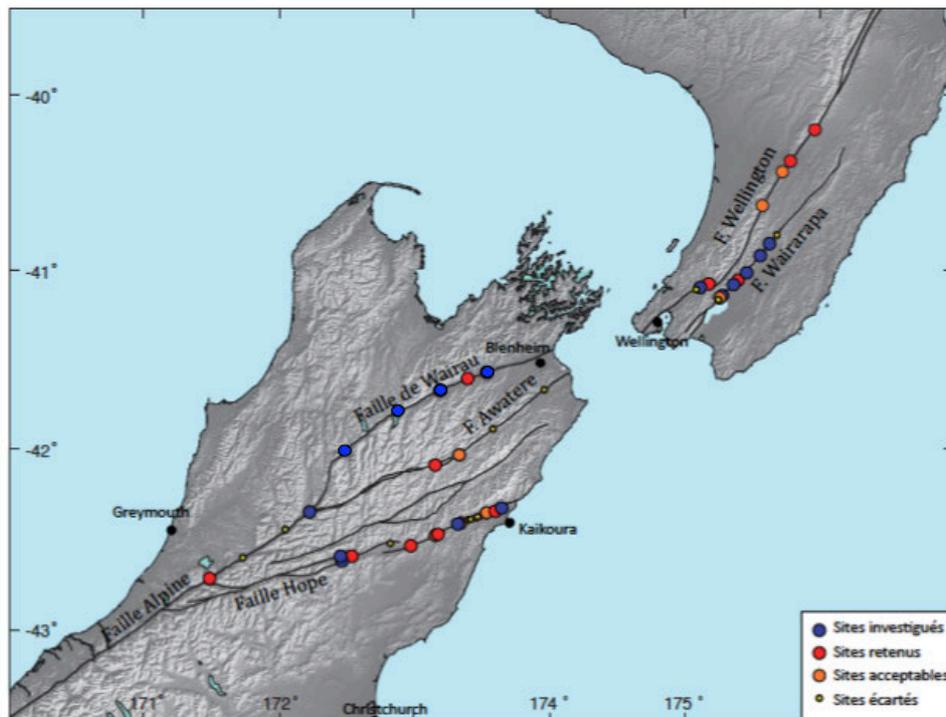
### **E.4 BILAN ET SUIVI DES PERSONNELS RECRUTES EN CDD (HORS STAGIAIRES)**

Identification				Avant le recrutement sur le projet			Recrutement sur le projet				Après le projet
Nom et prénom	Sexe H/F	Adresse email (1)	Date des dernières nouvelles	Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement	Lieu d'études (France, UE, hors UE)	Expérience prof. Antérieure, y compris post-docs (ans)	Partenaire ayant embauché la personne	Poste dans le projet (2)	Durée missions (mois) (3)	Date de fin de mission sur le projet	Devenir professionnel (4)
Beauprêtre Sophie	F	s.beauprete@geolink-s2.com	10/2014	PhD	France	/	ISTerre	Post-doc	6	Juillet 2013	Ingénieur développement chez Geolink
Vitard Clément	M	Clement.vitard@geoazur.unice.fr	03/2015	M2	France	/	Géoazur	Assistant ingénieur	1	Juillet 2012	Thèse en cours à Géoazur

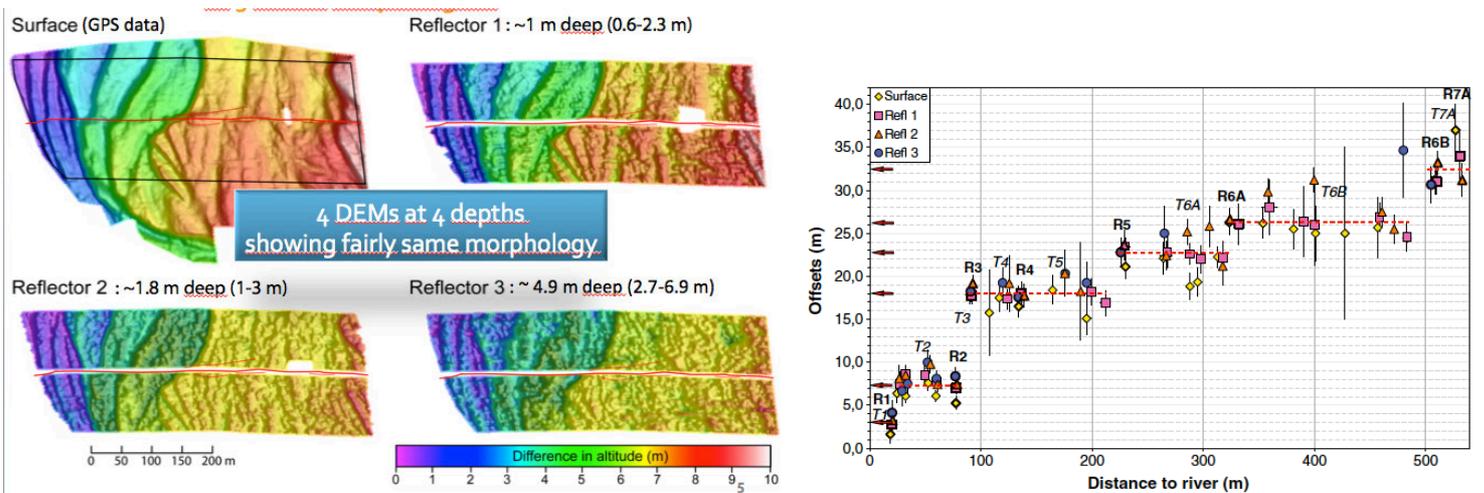
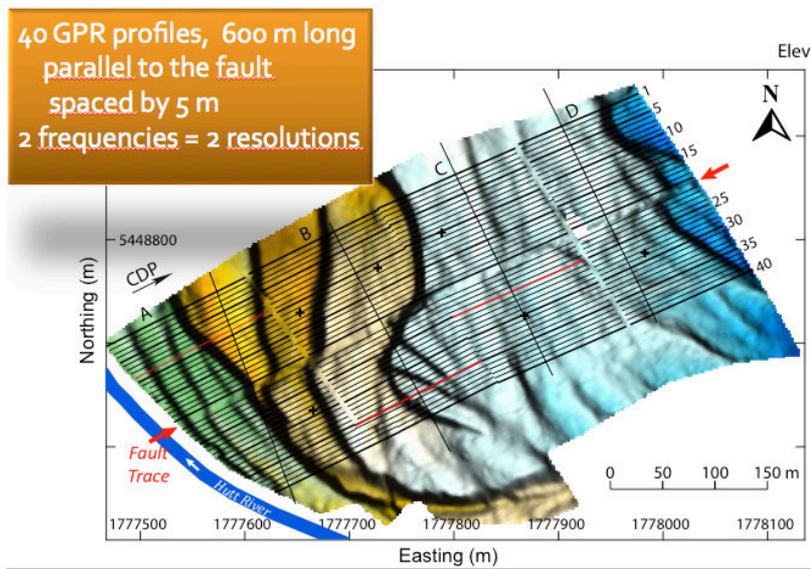
**ANNEXES\_projet  
CENTURISK\_Manighetti  
Rapport Final Février  
2015**



**Figure 1 :** Gauche, profils GPR acquis au site Terako, faille de Hope. Les 2 branches de la faille sont en rouge, les profils mesurés en noir, les CMP en ronds blancs. Droite, MNT d'un réflecteur GPR principal révélant des chenaux enfouis sous la surface. Ces chenaux, qui apparaissent comment des tracés sombres, sont invisibles en surface. Haut, exemple de profil GPR où les chenaux enfouis sont visibles sous forme de dépressions transparentes (d'après Beauprêtre et al., 2012)

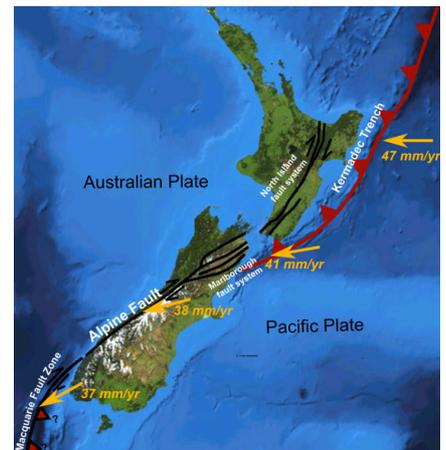
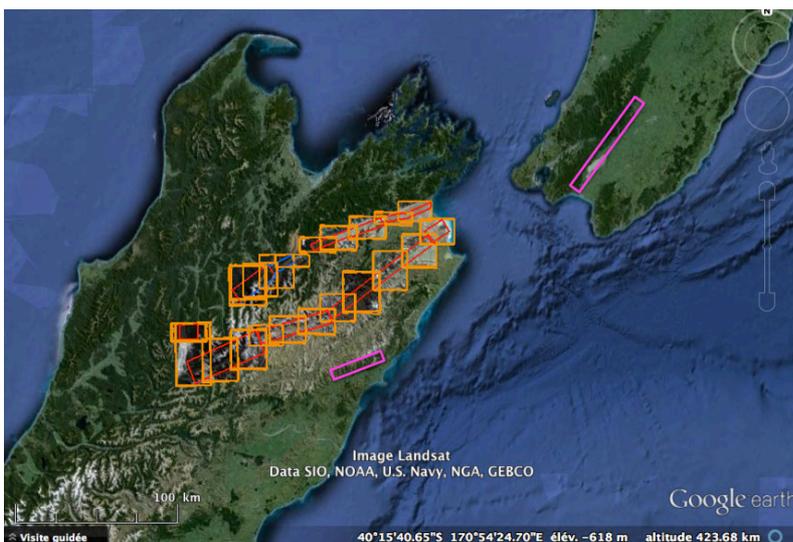


**Figure 2 :** Localisation des sites GPR : analysés en GPS et GPR pseudo-3D (bleu), explorés sur le terrain et retenus pour études ultérieures (rouge et orange), ou jugés non appropriés (jaune)

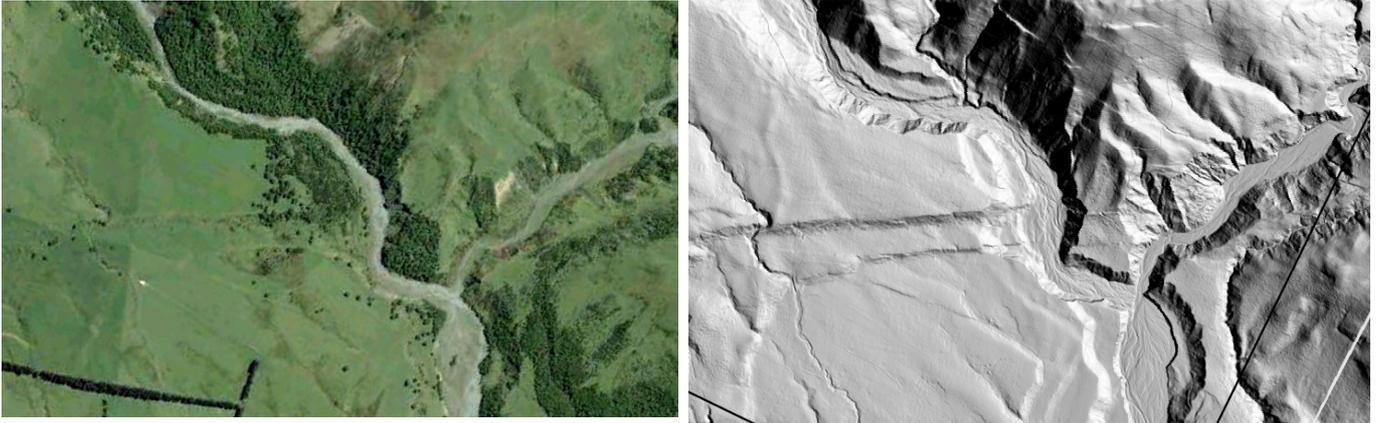


**Figure 3 : site Te Marua (faille de Wellington)**

En haut: Profils GPR mesurés, superposés au MNT GPS. Bas-gauche : MNT des 3 surfaces enfouies, comparés au MNT de la surface du sol. Bas-droite : déplacements mesurés dans les différents horizons GPR, par rapport à un repère géographique fixe. La plupart des déplacements mesurés en surface sont sous-estimés par rapport à ceux mesurés dans la sub-surface. D'après Beauprêtre et al., 2013.



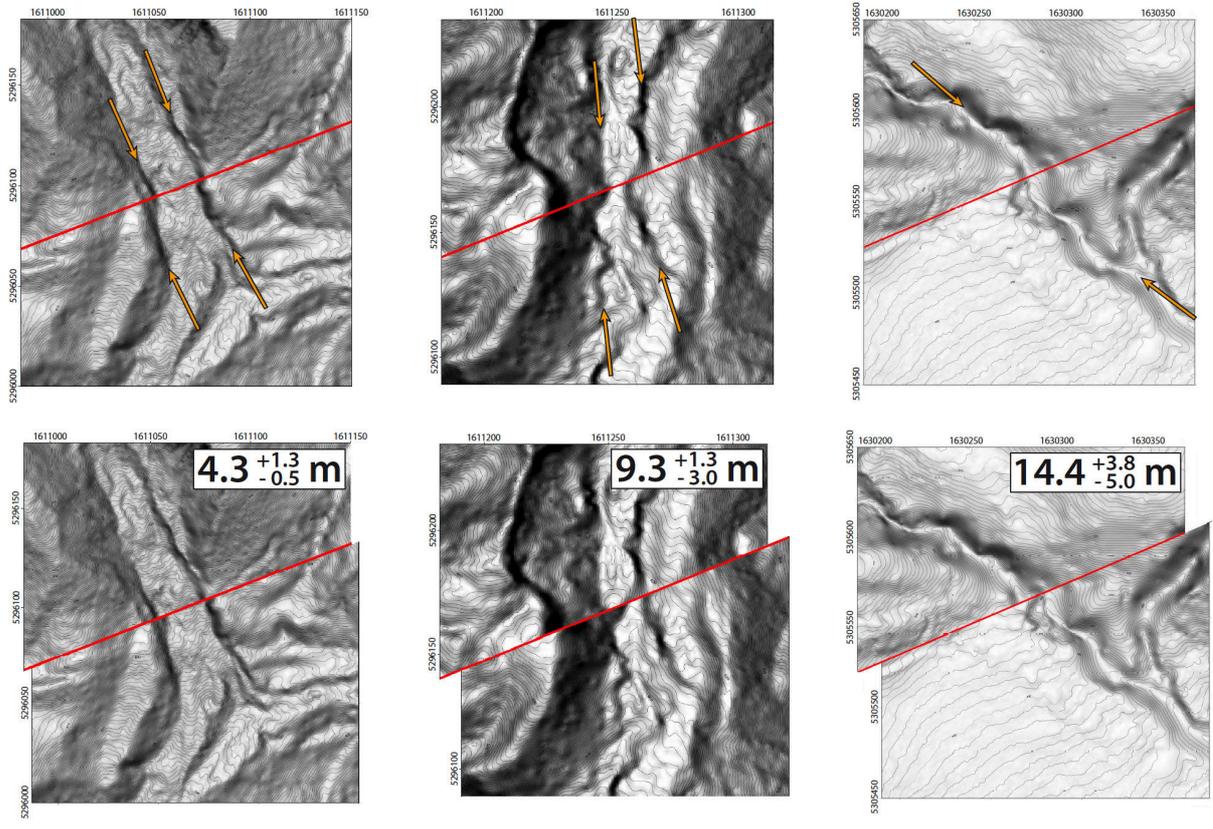
**Fig. 4 :** Localisation des données LiDAR (en rose) et PLEIADES (en orange) que nous avons acquises dans le cadre du projet (bandes rouges = traces de deux des failles) (l'encadré situe les failles)



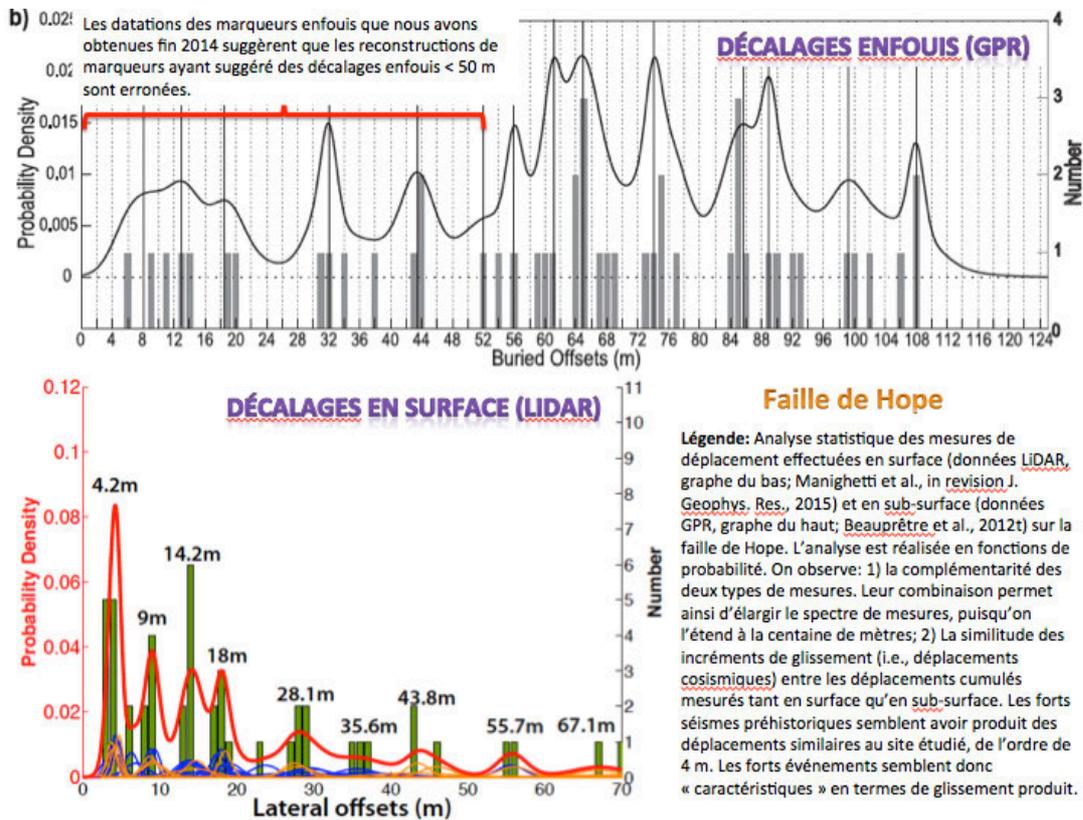
**Fig. 5 :** Comparaison d'une image optique (gauche) avec des données LiDAR (droite) sur la même zone. Alors que la végétation masque une partie de la morphologie sur l'image optique, la surface du sol est entièrement décrite et mesurée dans les données LiDAR (Manighetti et al., en révision JGR, 2015).



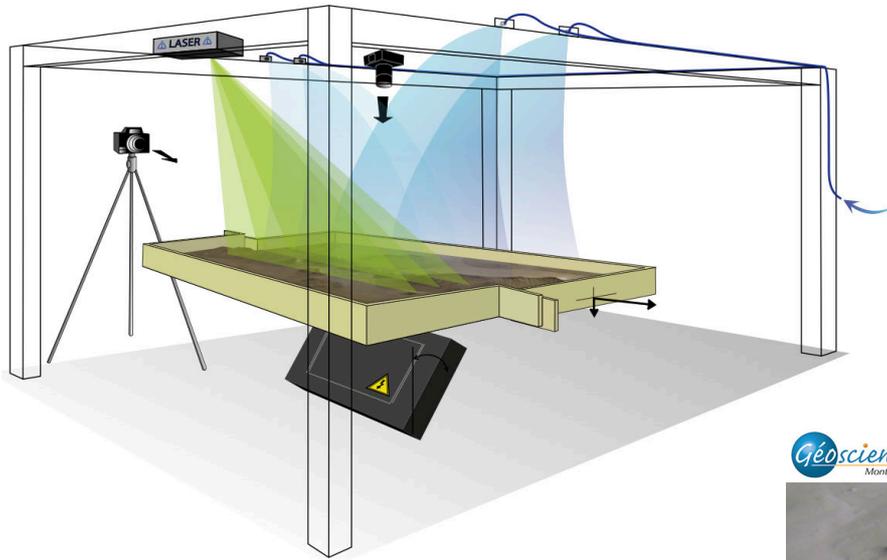
**Fig. 6 :** Zoom extrait de l'une des images Pléiades acquises sur la faille de Wairau. La zone d'arbres en bas de l'image donne l'échelle.



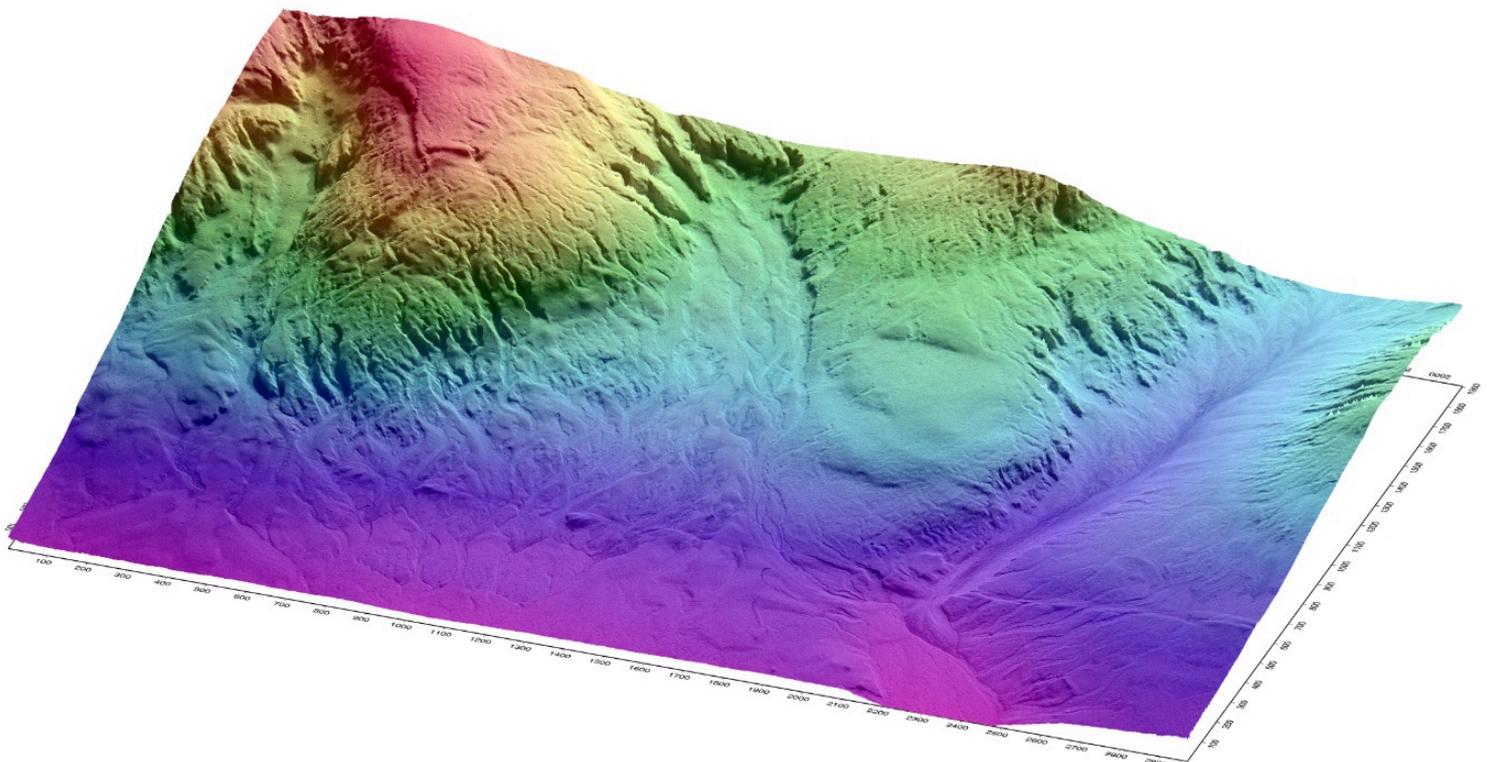
**Fig. 7 :** Données topographiques LiDAR montrant, en haut, 3 « objets morphologiques » décalés latéralement par une faille décrochante (trait rouge) : les deux bords d'un lit de rivière à gauche, deux bords de terrasse alluviale au centre, un chenal alluvial à droite. Les graphes du bas montrent la reconstruction de la forme originelle des objets décalés, ici effectuée en deux dimensions (i.e., en carte). Cette reconstruction permet la mesure des déplacements sur la faille (chiffres encadrés) ayant induit le décalage latéral des objets (d'après Manighetti et al., en révision JGR 2015).

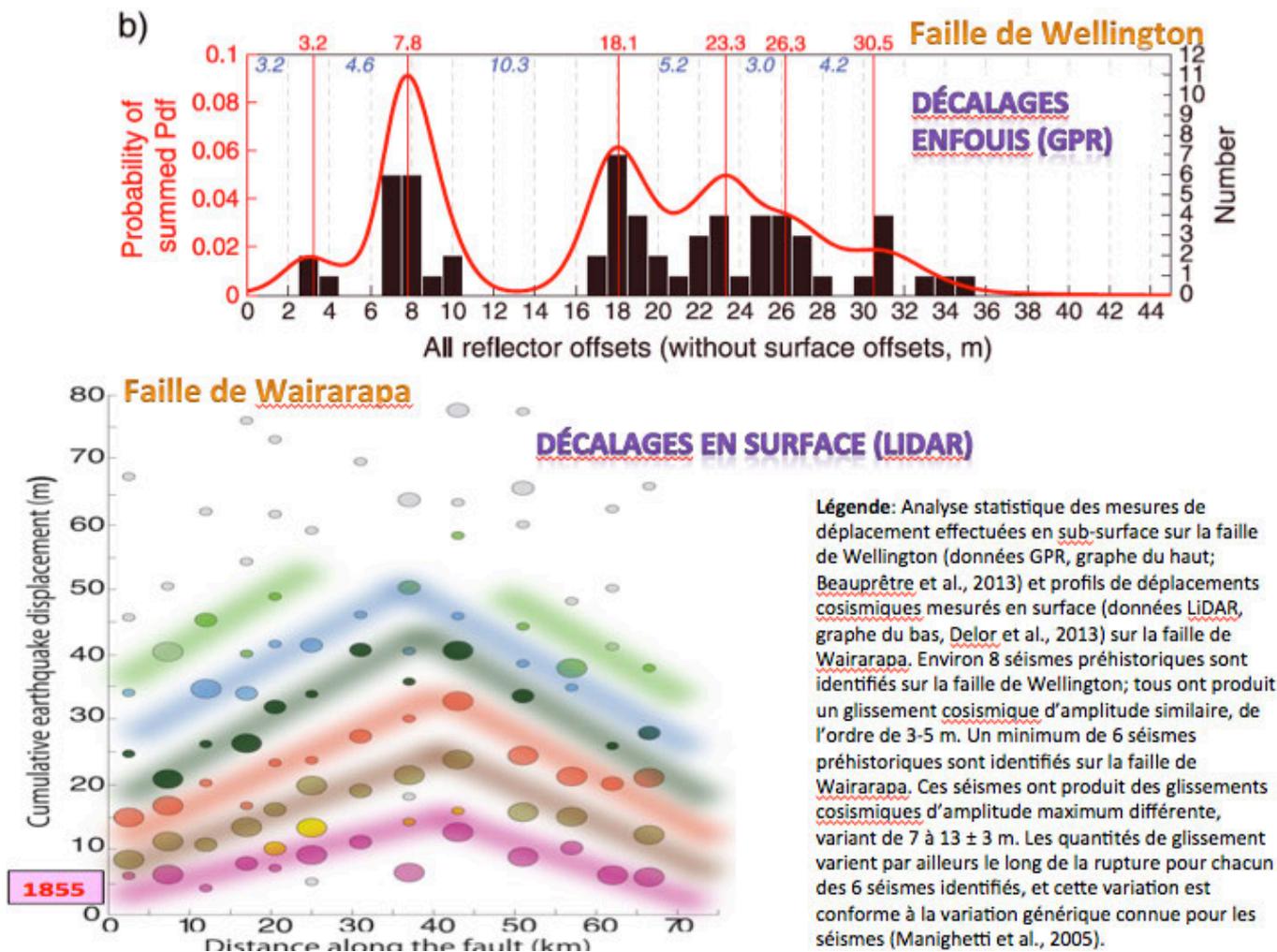


**Fig. 8**

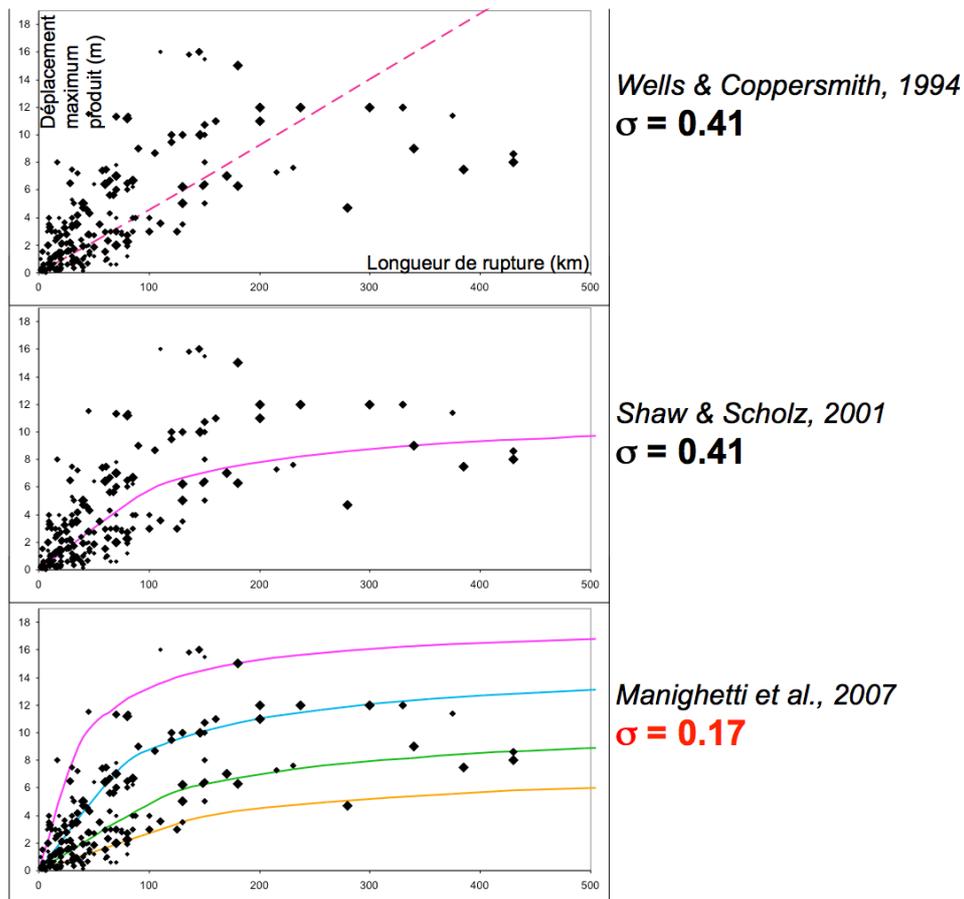


**Figure 9 : Nouveau protocole analogique**, permettant le suivi quantitatif de la morphologie et des marqueurs alluviaux qu'elle comporte, en fonction des glissements sismiques répétés sur la faille, de l'érosion et de la sédimentation





**Fig. 10 :** catalogues des déplacements cosismiques préhistoriques (et donc des magnitudes) déterminés sur les failles de Wellington et de Wairarapa



**Fig. 11 :** Lois empiriques proposées à l'heure actuelle entre la longueur de rupture d'un séisme (intracontinental) et le déplacement maximum que ce séisme produit à la surface du sol. Les points noirs sont les mesures réelles effectuées sur les séismes historiques connus. On voit que les lois présentées en haut et au centre (courbes roses) ne reproduisent pas les observations de façon satisfaisante (écart aux données mesuré par le paramètre  $\sigma$ ). Les lois que nous avons développées ces dernières années décrivent mieux les données. Les quatre fonctions (en violet, bleu, vert et orange) décrivent la maturité structurale des failles géologiques rompues. Connaissant les propriétés d'une faille au préalable de sa rupture, dont sa maturité structurale (souvent suggérée par sa longueur), on peut utiliser les lois proposées pour anticiper l'amplitude maximum des déplacements que le plus fort séisme sur cette faille produira dans le futur. La magnitude de ce séisme futur peut alors être estimée.