



**HAL**  
open science

**Cartographie et évaluation de la dynamique à court terme d'instabilités gravitaires de grandes ampleurs : exemple du massif de la Cristallère en haute Vallée d'Aspe (Pyrénées-Atlantiques, Nouvelle-Aquitaine, France) : apports des mesures de positionnement satellitaire et des observations aériennes par drone**

Amélie Thomas

► **To cite this version:**

Amélie Thomas. Cartographie et évaluation de la dynamique à court terme d'instabilités gravitaires de grandes ampleurs : exemple du massif de la Cristallère en haute Vallée d'Aspe (Pyrénées-Atlantiques, Nouvelle-Aquitaine, France) : apports des mesures de positionnement satellitaire et des observations aériennes par drone. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université de Bordeaux, 2017. Français. NNT : 2017BORD0914 . tel-01816396

**HAL Id: tel-01816396**

**<https://theses.hal.science/tel-01816396>**

Submitted on 15 Jun 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE PRÉSENTÉE

POUR OBTENIR LE GRADE DE

**DOCTEUR**  
**UNIVERSITÉ DE BORDEAUX**

École Doctorale des Sciences Physiques et de l'Ingénieur

Spécialité : Mécanique

**Amélie THOMAS**

**Cartographie et évaluation de la dynamique à court terme  
d'instabilités gravitaires de grandes ampleurs**

**Exemple du massif de la Cristallère en haute Vallée d'Aspe  
(Pyrénées-Atlantiques, Nouvelle-Aquitaine, France)**

**Apports des mesures par positionnement satellitaire et des  
observations aériennes par drone**

Sous la direction d'Alain DENIS et de Jean-François LATASTE

Soutenue publiquement le 20 décembre 2017 devant le jury composé de :

Mme GASC Muriel (Directrice de recherche, CEREMA Aix-en-Provence)	Présidente
M. LEBOURG Thomas (Professeur, Université de Nice-Sophia-Antipolis)	Rapporteur
M. CAUSSE Lionel (Docteur, SNCF Réseau Paris : Direction Ingénierie & Projets)	Examineur
M. DENIS Alain (Professeur, Université de Bordeaux)	Directeur
M. LATASTE Jean-François (Maître de conférences, Université de Bordeaux)	Codirecteur
M. FABRE Richard (Professeur retraité, Université de Bordeaux)	Invité
M. PRETOU Frédéric (Directeur, CETRA Laroin)	Invité



**Unité de recherche I2M-GCE**

Institut de Mécanique et d'Ingénierie – Département Génie Civil et Environnemental

CNRS : UMR 5295



# **Cartographie et évaluation de la dynamique à court terme d'instabilités gravitaires de grandes ampleurs**

## **Exemple du massif de la Cristallère en haute Vallée d'Aspe (Pyrénées-Atlantiques, Nouvelle-Aquitaine, France)**

### **Apports des mesures par positionnement satellitaire et des observations aériennes par drone**

Depuis ces dernières décennies, peu de sujets de la géologie de l'ingénieur ont attiré autant l'attention de la communauté scientifique que ceux traitant des risques naturels et plus particulièrement des instabilités gravitaires de grandes ampleurs reconnues sous les termes de DSGSD (Deep Seated Gravitational Slope Deformation) et de DSL (Deep Seated Landslide). Basée sur un nombre limité de cas d'étude à l'échelle naturelle (couplage datation et surveillance récente), la dynamique temporelle à court terme reste l'un de leurs aspects les moins étudiés aujourd'hui. Nous avons choisi l'exemple du massif de la Cristallère, situé en haute Vallée d'Aspe dans les Pyrénées béarnaises, où le DSL de la Cristallère a été récemment identifié et analysé à partir de deux méthodes de datation.

Dans la continuité de ce travail, notre première approche consiste à évaluer la dynamique temporelle à court terme des mouvements de ce versant à différentes échelles et à partir de différentes méthodes de positionnement par satellites (constellations GPS et GLONASS) : positionnement multistations RGP (Réseau Géodésique Permanent), statique géodésique avec pivot et statique rapide avec pivot. Nous insistons dans ce travail, compte tenu des résultats originaux obtenus, sur l'intérêt du différentiel GNSS (Global Navigation Satellite System) avec un pivot qui se doit d'être proche géographiquement des observations à mener afin d'assurer une précision suffisante (de l'ordre du cm).

Les observations et l'exploitation des modèles numériques de terrain issues des relevés aériens à différentes échelles obtenus avec un drone du type « aile volante » constituent la deuxième approche de ce travail de recherche. Elles viennent compléter la cartographie du site et démontrer l'existence d'un DSGSD à partir d'une caractérisation géomorphométrique haute résolution et haute précision (de l'ordre du cm également) ; elles permettent d'affiner la délimitation du DSL de la Cristallère et de sa zone la plus active (Pène du Thès) et du DSL du Peilhau.

À ces deux approches complémentaires (combinaison de données tridimensionnelles ponctuelles et surfaciques), s'ajoutent préalablement un relevé de terrain géologique et

géophysique (mesures structurales, tomographies de résistivités électriques et profils électromagnétiques Very Low Frequency) ainsi qu'une analyse des archives disponibles sur les ouvrages présents dans le versant instable, tels que la galerie drainante de la centrale hydroélectrique du Baralet et l'ancien tunnel ferroviaire du Peilhou.

L'utilisation combinée de ces trois approches confirme que les mouvements profonds du massif de la Cristallère sont encore actifs avec un forçage sismique avéré : la prise de conscience du rôle que peut jouer le DSGSD est tout aussi fondamentale. Ainsi tous les ouvrages existants dans le massif, ou les projets d'aménagement ou de réhabilitation sur ce site doivent considérer l'existence d'une déstructuration, lente et progressive de l'ensemble du massif (DSGSD). Par ailleurs, la méthodologie développée dans ce travail se veut générale et peut être utilisée pour surveiller et suivre, à court et moyen terme, tous types de mouvement de terrain, et en particulier les glissements de terrain ou rocheux, profonds ou superficiels, lents ou rapides.

**Mots-clefs :** Géologie, DSGSD, Glissement rocheux profond, Différentiel GNSS, Drone, MNT

# **Mapping and evaluation of the short term dynamics of large-scale gravitational instabilities**

## **Example of the *Cristallère* massif in Upper Aspe Valley (*Pyrénées-Atlantiques, Nouvelle-Aquitaine* region, France)**

### **Contributions of satellite positioning measurements and aerial observations by drone**

For these last decades, few subjects of the geology of the engineer have drawn the attention of the scientific community as much as those dealing of the natural hazards and more particularly with large-scale gravitational instabilities known as DSGSD (Deep Seated Gravitational Slope Deformation) and DSL (Deep Seated Landslide). Based on few cases study on a natural scale (dating and recent monitoring), short term temporal dynamics remains one of their least studied aspects today. We made the choice of the *Cristallère* massif as an example. It is located in Upper Aspe Valley of the Pyrenees (*Béarn* region). The *Cristallère* DSL was recently identified and analyzed through two dating methods.

On the basis of this work, our first approach consists in assessing short term temporal dynamics of these slopes movements on various scales and with various methods of satellites positioning (GPS and GLONASS constellations): multistation positioning RGP (Permanent Geodetic Network in France), statics geodetic with pivot and fast static with pivot. We insist in this work, given the original results obtained, on the interest of the differential GNSS (Global Navigation Satellite System) with a pivot which must be geographically close to the observations to be carried out in order to ensure sufficient accuracy (cm).

Observations and exploitation of drone digital elevation models of the site from aerial surveys at different scales obtained with a “flying wing” are the second approach to this research work. They complete the mapping of the site and demonstrate the existence of a DSGSD based on a high resolution and high precision geomorphometric characterization (cm); they make it possible to refine the delimitation of the *Cristallère* DSL and its most active area (*Pène du Thès*) and the *Peilhou* DSL.

In addition to these two complementary approaches, a geological and geophysical survey (structural geology measurements, electrical resistivity tomographies and electromagnetic profiles Very Low Frequency surveys) and an analysis of the available data on the structures present in the unstable slope, such as the large diameter underground water pipe for the hydroelectric plant of *Baralet* and the former railway tunnel of *Peilhou*.

The combined use of these three approaches confirms that the deep movements of the *Cristallère* massif are still active with proven seismic forcing: awareness of the potential role taken by the DSGSD is then fundamental. Thus, all the existing structures in the massif or the projects on this site (new constructions or rehabilitation of old structures) have to consider the existence of a slow and gradual change of the entire massif (DSGSD). Moreover, the methodology developed in this work is intended to be general. It also makes possible to monitor and follow, in the short and medium term, all types of ground movement, in particular landslides or rockslides, deep or superficial, slow or fast.

**Keyword** : Geology, DSGSD, Deep Seated Landslide, Differential GNSS, UAV, DEM

## REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ici mes plus vifs remerciements et toute ma reconnaissance à ceux qui ont rendu possible cette expérience.

Je tiens à remercier mes directeurs de thèse, messieurs Richard FABRE, Alain DENIS, Jean-François LATASTE pour la confiance et la liberté qu'ils m'ont accordées.

Je tiens à remercier mon encadrant, Frédéric PRETOU, codirecteur de l'entreprise CETRA avec Gérard TILLARD, et leurs collaborateurs pour leur accueil chaleureux. Fred, je te remercie infiniment de m'avoir offert cette opportunité, de ton soutien, tout au long de cette aventure et plus particulièrement dans les derniers jours avant la soutenance ; si tu n'avais pas été là, je n'aurais pu poser le point final de cette aventure.

Je tiens à remercier l'ensemble des membres du jury de leur intérêt pour ce travail et de la qualité de leurs remarques et plus particulièrement :

- Madame Muriel GASC d'avoir accepté de présider le jury et d'être rapporteur,
- Monsieur Thomas LEBOURG d'avoir accepté d'être rapporteur également,
- Monsieur Lionel CAUSSE d'avoir accepté d'être examinateur lors de la soutenance.

Je tiens à remercier les partenaires suivants qui ont contribué au bon déroulement de ce travail : l'ANRT pour le compte du Ministère de la Recherche, la Nouvelle-Région Aquitaine, l'entreprise suisse SenseFly et l'entreprise américaine Trimble.

Je tiens à témoigner toute ma sympathie à l'ensemble des personnes qui ont pu prendre part à cette aventure que ce soit de près ou de loin sans toutefois tous les nommer : je n'ose me prêter à l'exercice tant il est délicat.

Ces quelques lignes ne peuvent s'achever sans remercier du fond du cœur ceux qui me sont très chers et qui sont en Bretagne bien loin des Pyrénées. J'adresse donc mes plus profonds remerciements à mes parents pour leurs soutiens moral et matériel et leur confiance indéfectible dans mes choix. J'ai également une pensée toute particulière pour mon petit frère Sébastien. Mes derniers mots vont pour celui avec qui je partage ma vie, Jérémy : je te dis simplement merci pour ta patience et ton soutien.



« À quoi bon soulever des montagnes quand il est si simple de passer par-dessus ? »

*Boris Vian*



## SOMMAIRE

<b>I. INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>15</b>
<b>II. ETAT DES CONNAISSANCES ET CADRE DE L'ETUDE .....</b>	<b>19</b>
<b>II.1 LES INSTABILITES GRAVITAIRES DE GRANDES AMPLEURS.....</b>	<b>21</b>
<b>II.2 LE MASSIF DE LA CRISTALLERE .....</b>	<b>51</b>
<b>II.3 SYNTHESE DE L'ETAT DES CONNAISSANCES ET DU CADRE DE L'ETUDE.....</b>	<b>85</b>
<b>III. METHODOLOGIE .....</b>	<b>87</b>
<b>III.1 OUTILS ET METHODES POUR LE POSITIONNEMENT PAR SATELLITES DGNSS AVEC   LES CONSTELLATIONS GPS &amp; GLONASS .....</b>	<b>89</b>
<b>III.2 OUTILS ET METHODES POUR LES OBSERVATIONS AVEC UN DRONE DU TYPE AILE   VOLANTE RGB.....</b>	<b>108</b>
<b>III.3 SYNTHESE DE LA METHODOLOGIE .....</b>	<b>117</b>
<b>IV. RESULTATS ET DISCUSSION.....</b>	<b>119</b>
<b>IV.1 RESULTATS COMMENTES DE L'AUSCULTATION PAR SATELLITES : DGNSS   (CONSTELLATIONS GPS &amp; GLONASS) .....</b>	<b>121</b>
<b>IV.2 RESULTATS COMMENTES DES OBSERVATIONS AERIENNES AVEC UN DRONE TYPE   AILE VOLANTE RGB.....</b>	<b>163</b>
<b>IV.3 SYNTHESE GEOLOGIQUE ET STRUCTURALE DES DEFORMATIONS MESUREES DANS   LE DSL DE LA CRISTALLERE .....</b>	<b>172</b>
<b>V. CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>181</b>
<b>REFERENCES .....</b>	<b>185</b>

<b><u>ANNEXE. CARNET DE DONNEES : OBSERVATIONS ET MESURES DE SURFACE SATELLITAIRE DGNSS (CONSTELLATIONS GPS &amp; GLONASS) ....</u></b>	<b><u>207</u></b>
<b><u>LISTE DES FIGURES.....</u></b>	<b><u>307</u></b>
<b><u>LISTE DES TABLEAUX .....</u></b>	<b><u>327</u></b>
<b><u>TABLE DES MATIERES.....</u></b>	<b><u>339</u></b>

## I. INTRODUCTION GENERALE

### Contextes : général et spécifique

Les instabilités gravitaires sont des phénomènes de plus en plus étudiés à l'heure actuelle. Le monde scientifique manifeste un intérêt croissant pour ces phénomènes naturels qui s'avèrent être beaucoup plus complexes que prévu. De nouveaux outils et de nouvelles méthodes sont ainsi développés pour mieux les apprécier. C'est exactement dans ce contexte que s'inscrit le présent travail de recherche appliqué et opérationnel, où nous avons tenté d'associer les procédés classiques (relevés géologiques de terrain, prospections géophysiques, observations des photographies aériennes, etc.) et des procédés nouveaux ou récents.

D'où peut venir cet intérêt croissant pour ce type de phénomène ? De nombreuses hypothèses peuvent être émises, mais l'une des explications pourrait bien être l'intérêt que manifeste la population pour tout ce qui touche aux catastrophes naturelles : la « soif » d'information avec un accès immédiat – filtrée ou non – ; la pression médiatique sur le grand thème qu'est le réchauffement climatique ; l'idée reçue, ou non, qu'avec ce réchauffement de plus en plus de catastrophes naturelles auront lieu. Autant de paramètres qui engendrent des craintes voire même des peurs sur la population qui exige des réponses immédiates aujourd'hui ; qui plus est dans un contexte sociétal de plus en plus procédurier où un phénomène naturel dommageable n'est plus concevable et où il faut trouver un responsable.

Ainsi, ces aspects plutôt négatifs de l'évolution de notre société ont au moins le mérite de poser question, ce qui bénéficie à la communauté scientifique (dans sa globalité, mais pas forcément américaine à l'heure de la rédaction de ce document) qui peut ainsi drainer quelques crédits de recherche pour s'intéresser à ces phénomènes. Et parmi ces phénomènes les instabilités gravitaires sont malheureusement bien placées, car parfois brutales et dévastatrices.

Ce travail de recherche a été cosupporté dans le cadre d'une bourse CIFRE (Conventions Industrielles de Formation par la REcherche) par le bureau d'étude CETRA (Cabinet d'Études Techniques Rurales et Agricoles) implanté à Laroin près de Pau dans les Pyrénées-Atlantiques et le Département Génie Civil et Environnemental de l'Institut de Mécanique et d'Ingénierie (I2M-GCE) de l'université de Bordeaux. Les partenaires suivants ont également aidé financièrement au bon déroulement de ce travail : la région Aquitaine

(devenue depuis la région Nouvelle-Aquitaine), l'entreprise suisse SenseFly et, via leur antenne française, l'entreprise américaine Trimble.

### Objectifs et applications développées

Dans le cadre de ce travail nous avons focalisé toute notre attention sur les instabilités gravitaires de grandes ampleurs reconnues principalement sous les termes de DSGSD (« Deep-Seated Gravitational Slope Deformation ») et de DSL (« Deep-Seated Landslide »). Pour ce faire, nous avons pris l'exemple d'un site remarquable qui se trouve dans les Pyrénées françaises, en haute Vallée d'Aspe, où le DSL de La Cristallère a été récemment identifié (Lebourg et al., 2014).

Que ce soit un mouvement de masse élémentaire ou une instabilité gravitaire de grande ampleur, leur présence traduit dans tous les cas le résultat d'un déséquilibre entre les processus exogènes et les processus endogènes pouvant rentrer en jeu, en particulier dans un milieu au relief marqué comme le sont les massifs montagneux. L'un des défis aujourd'hui pour la communauté scientifique est de comprendre la dynamique temporelle à court terme et moyen terme de ces phénomènes, puisque basée sur un nombre limité de cas d'études à l'échelle naturelle.

Notre première approche consiste à évaluer la dynamique temporelle à court terme des mouvements de ce versant à différentes échelles et à partir de différentes méthodes de positionnement par satellites (constellations GPS et GLONASS). Les observations et l'exploitation des modèles numériques de terrain issues des relevés aériens à différentes échelles obtenus avec un drone du type aile volante constituent la deuxième approche de ce travail de recherche.

Ces deux applications récentes ont bien entendu complété une approche essentielle plus classique pour aider à la compréhension globale du site. Cette dernière a donc logiquement intégré de nouveaux relevés de terrain géologiques et de nouvelles campagnes géophysiques, en tentant au passage de trouver de nouvelles applications pour d'anciens outils comme le VLF (« Very Low Frequency »).

### Plan du manuscrit

Ce manuscrit est décomposé en trois parties générales à la fois distinctes et étroitement liées. Nous avons choisi d'adopter cette disposition afin que chercheurs confirmés ou simples curieux puissent comprendre notre démarche scientifique et le processus de réflexion qui l'accompagne, tout en se gardant la possibilité de ne s'intéresser qu'à la partie de son choix.

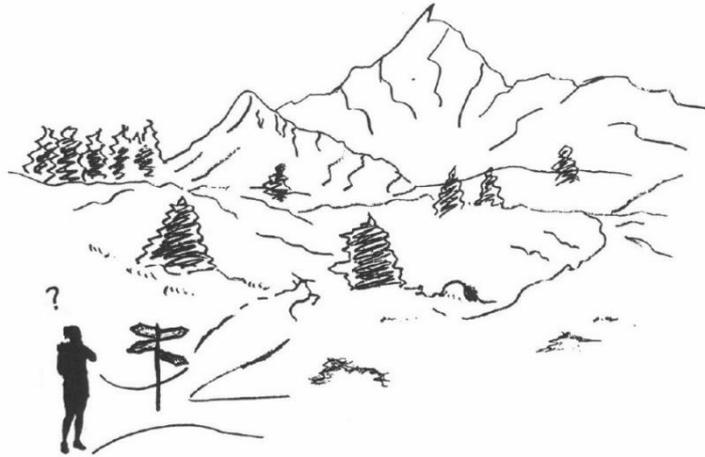
Dans une première partie (cf. partie II), nous établissons d'abord un état des connaissances non exhaustif sur les instabilités gravitaires de grandes ampleurs et présentons les particularités du site choisi. C'est un élément de base pour la compréhension globale de ce travail de recherche.

Dans une deuxième partie (cf. partie III), nous présentons la méthodologie retenue et développée dans le cadre de ce travail de recherche. Les applications notables suivantes sont présentées et justifiées : le positionnement terrestre par satellites et les observations aériennes avec un drone type aile volante. Le déroulement des étapes pour chacune de ces investigations est expliqué afin qu'elles soient reproductibles pour n'importe quel cas d'étude à l'échelle naturelle, et ce quel que soit le lieu.

Dans une troisième partie (cf. partie IV) , nous présentons et commentons les résultats majeurs obtenus avec chacune de ces deux applications. Ces résultats majeurs sont critiqués selon les limites inhérentes liées aux applications elles-mêmes : nous les précisons. Une discussion générale sur le massif de la Cristallère et les instabilités gravitaires qui l'affectent en liaison avec les forçages qui coexistent est ensuite faite en tenant compte de ces deux applications notables et de l'aide qu'elles apportent dans l'approche plus classique indispensable pour la compréhension du site. Nous proposons enfin des perspectives et des prospectives qui s'avèrent être finalement nombreuses.



## II. ETAT DES CONNAISSANCES ET CADRE DE L'ETUDE



Depuis ces dernières décennies, assez peu de sujets de la géologie de l'ingénieur ont attiré autant l'attention de la communauté scientifique que ceux traitant des risques naturels et plus particulièrement les instabilités gravitaires de grandes ampleurs reconnues principalement sous les termes DSGSD (« Deep-Seated Gravitational Slope Deformation ») et DSL (« Deep-Seated Landslide »). Nous verrons dans cette partie que l'un des défis majeurs à accomplir aujourd'hui par les scientifiques est de comprendre et préciser la dynamique à court terme de ces instabilités gravitaires de grandes ampleurs de type DSGSD et de type DSL afin d'enrichir la base de données existante et la connaissance à ce sujet.

Dans une première partie (cf. partie II.1), nous établissons dans un premier temps un constat général sur les instabilités gravitaires de grandes ampleurs à partir d'une macro analyse de la production scientifique et d'une critique des classifications. Nous revenons, à partir d'exemples significatifs sur la notion de risque à laquelle ces instabilités gravitaires peuvent être associés : la prise de conscience du rôle que peut jouer un DSGSD dans un mouvement de versant est fondamentale. Nous présentons dans un deuxième temps la définition admise par la communauté scientifique pour un DSGSD (mouvement lent, très important volume mobilisé, mécanisme de déformation complexe et sujet à caution, etc.). Nous précisons la distribution géographique, la probabilité d'occurrence, les caractéristiques

typiques, les types et mécanismes de ce mouvement. Nous insistons d'ailleurs sur la différence significative entre le glissement de type DSGSD et de type DSL selon la vision qu'en donnent les auteurs qui s'y intéressent (Crosta & Zanchi, 2000 ; Agliardi et al., 2001 ; Ambrosi & Crosta, 2011 ; Agliardi et al., 2012 ; Crosta et al., 2013 ; Soldati, 2013 ; Pánek & Klimeš 2016 ; etc.). Nous expliquons ensuite les approches scientifiques qu'utilisent actuellement les chercheurs pour étudier ces instabilités gravitaires de grandes ampleurs.

Dans une deuxième partie (cf. partie II.2), nous présentons le massif de la Cristallère qui se situe en rive gauche de la haute Vallée d'Aspe (Pyrénées-Atlantiques) près de la frontière franco-espagnole, où a été récemment identifié et décrit le DSL de la Cristallère (Lebourg et al., 2014). Nous expliquons dans cette partie les particularités intrinsèques du site : l'orohydrographie, l'occupation des sols - en insistant ici sur la notion indispensable de « *cryptoanthropisme* » -, le climat et la sismicité. Nous détaillons ensuite plus amplement la géologie de la haute vallée d'Aspe : i) les formations géologiques rencontrées sont présentées et ii) les structures tectoniques du Paléozoïque observées sont illustrées. Nous terminons cette partie par un état de l'art succinct des investigations déjà menées sur les instabilités gravitaires de ce massif.

Nous verrons finalement en synthèse (cf. partie II.3) que cet état des connaissances nous permet de mettre, avant tout, en exergue, les particularités de notre démarche scientifique et sa méthodologie d'analyse instrumentale (cf. partie III. Méthodologie) puisque nous envisageons par ce travail d'étudier les phénomènes DSGSD et DSL à l'échelle naturelle afin de comprendre et quantifier leurs dynamiques actuelles dans les Pyrénées et les conséquences directes qui peuvent en résulter (cf. partie IV. Résultats et discussion).

## **II.1 LES INSTABILITES GRAVITAIRES DE GRANDES AMPLEURS**

Nous commençons par établir un constat général sur les instabilités gravitaires de grandes ampleurs (cf. partie II.1.1). Nous présentons ensuite plus amplement la plus importante instabilité gravitaire reconnue depuis ces dernières décennies par les scientifiques (cf. partie II.1.2) : le « Deep-Seated Gravitational Slope Deformation » (DSGSD). Nous expliquons enfin les approches qu'utilisent les scientifiques aujourd'hui pour les étudier à l'échelle naturelle. Ce travail a pour objectif principal de contribuer à parfaire la connaissance de ces grands mouvements de versants compte tenu des remarques qui suivent (cf. partie II.1.3) ; nous nous intéressons essentiellement à la dynamique temporelle à court terme de ces phénomènes physiques remarquables (cf. partie III. Méthodologie & partie IV. Résultats et discussion).

### **II.1.1 CONSTAT GENERAL ET REMARQUES**

Pour ce constat général, nous commentons au préalable l'état de la recherche scientifique sur les instabilités gravitaires de grandes ampleurs à l'échelle internationale (cf. partie II.1.1.1), nous faisons ensuite une critique sur les classifications qui existent actuellement (cf. partie II.1.1.2) et nous revenons enfin à partir d'exemples significatifs sur la notion de risque à laquelle ces instabilités gravitaires de grandes ampleurs peuvent finalement être associée (cf. partie II.1.1.3).

#### **II.1.1.1 Macro analyse de l'état de la recherche scientifique de 1970 à 2015**

Afin d'évaluer l'état de la recherche scientifique sur les instabilités gravitaires de grandes ampleurs à l'échelle internationale, nous avons effectué sommairement une macro analyse de la production scientifique sur ces dernières décennies soit entre les années 1970 et 2015. Notons toutefois que nous ne nous intéressons pas ici à la visibilité des institutions, qui requiert un niveau d'analyse vraiment différent, mais plutôt à une vision globale de la production de connaissances à ce sujet. Cette macro analyse nous permet en fait d'identifier les tendances quant à l'évolution de la production scientifique relative aux instabilités gravitaires et plus spécifiquement à celles de grandes ampleurs.

##### **a) Choix de la base de données et des critères**

Nous avons choisi d'interroger l'une des plus grandes bases de données de publications pluridisciplinaires. Il s'agit de la base de données de Scopus d'Elsevier amorcée en 2004. Cette base de données qui a la particularité d'être examinée par des pairs autrement dit un comité scientifique, propose un aperçu global de la production mondiale de la recherche avec une

assurance quant au choix des référencements faits. Notre dernière consultation via ce lien <https://www.elsevier.com/solutions/scopus> date du 15 juillet 2016.

Nous avons soumis à cette base de données les trois mots-clefs suivants : « landslide », « Deep-Seated Landslide » (DSL) et « Deep-Seated Gravitational Slope Deformation » (DSGSD). Le mot-clef « landslide » fait référence à l'ensemble des instabilités gravitaires : les écroulements rocheux, les affaissements de terrain, les coulées de terrain, les glissements rocheux complexes, etc. (cf. partie II.1.1.2 pour plus de précisions sur les différents types d'instabilités gravitaires). Tandis que les mots-clefs « DSL » et « DSGSD » font référence à celles de grandes ampleurs ; précisons que le DSGSD est aujourd'hui la plus importante instabilité gravitaire reconnue par les scientifiques. Nous reviendrons dans la suite de ce travail plus précisément sur leurs définitions puisque nous verrons qu'il existe à ce jour pour certains scientifiques une certaine confusion entre ces deux instabilités gravitaires (cf. partie II.1.2). Nous avons fait ce choix pour mener une étude comparative sommaire entre l'ensemble des instabilités gravitaires (« landslide ») et celles de grandes ampleurs (« DSL » et « DSGSD »).

Nous avons sélectionné pour cette macro analyse les six domaines thématiques suivants : « earth and planetary sciences » (sciences de la Terre et des planètes), « environmental science » (sciences de l'environnement), « engineering » (ingénierie), « physics and astronomy » (physique et astronomie), « decision sciences » (sciences de la décision), et « computer science » (informatique). Nous avons retenu également les sept indicateurs bibliométriques suivants : « article » (article scientifique publié), « review » (article en révision), « article in press » (article scientifique soumis à publication), « conference » (note de conférence acceptée), « conference review » (note de conférence en révision), « book » (livre à vocation scientifique) et « book chapter » (chapitre d'un livre à vocation scientifique).

## **b) Évolution de la production scientifique entre 1970 et 2015**

L'évolution de la production scientifique sur les instabilités gravitaires entre les années 1970 et 2015 est illustrée ci-après (cf. Figure II.1). Nous distinguons sur ce graphique, l'évolution du nombre de documents produits annuellement en fonction des 3 mots-clefs suivants : « landslide », « Deep-Seated Landslide » (DSL) et « Deep-Seated Gravitational Slope Deformation » (DSGSD).

Nous constatons que la production scientifique internationale, pour l'ensemble des instabilités gravitaires, enregistre une nette évolution depuis 1970 (cf. courbe « Landslide », Figure II.1). Nous comptabilisons sur Scopus un total de 16773 documents produits avec ce mot-clef pour cette période. Nous remarquons que cette évolution est d'ailleurs bien plus

significative à partir du début du XXI<sup>e</sup> siècle (cf. courbe « Landslide », Figure II.1) ; il s'agit là du 1<sup>er</sup> point d'inflexion notable pour l'évolution de la production scientifique sur les instabilités gravitaires. Nous comptabilisons sur cette base de données graduellement 229 documents en 2001, 329 documents en 2002, 408 documents en 2003, 1018 documents en 2010 et 1877 documents en 2013 contre un peu moins de 200 documents produits annuellement auparavant (cf. courbe « Landslide », Figure II.1) ; toutefois, une exception est faite pour les années 1988 (221 documents), 1997 (230 documents) et 1999 (210 documents). L'année 2013 est celle qui enregistre le plus de documents avec le mot-clef « landslide » (cf. courbe « Landslide », Figure II.1).

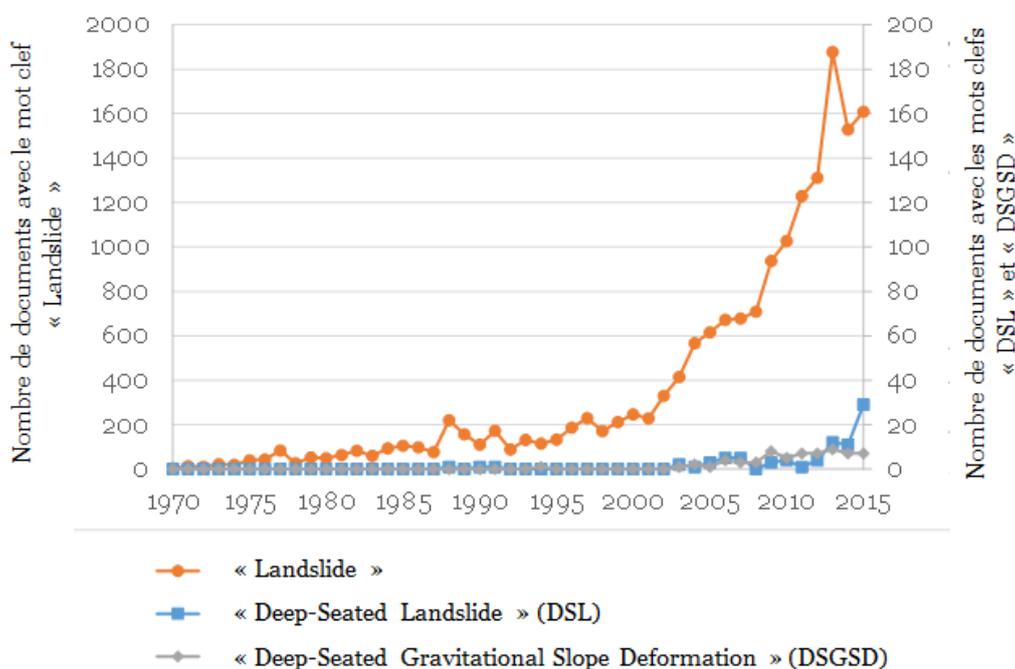


Figure II.1. Évolution de la production scientifique entre les années 1970 et 2015 en fonction du nombre de documents contenant les mots-clefs [a] « Landslide », [b] « Deep-Seated Landslide » (DSL) et [c] « Deep-Seated Gravitational Slope Deformation » (DSGSD). Illustration réalisée à partir d'une recherche par mots-clefs effectuée avec la base de données de Scopus (<https://www.elsevier.com/solutions/scopus>, dernière consultation en juillet 2016). Cf. Choix de la base de données et des critères pour le choix des domaines thématiques et des indicateurs bibliométriques.

L'engouement de la communauté scientifique pour ce sujet est donc bien réel et de plus en plus d'actualité compte tenu des remarques faites précédemment. Mais précisons que

l'avènement de l'informatique a bouleversé progressivement la diffusion du savoir ; il y a donc forcément une corrélation positive entre le nombre de documents produits annuellement et l'accès grandissant à cet outil. L'évolution de la production scientifique toutes disciplines confondues tend-elle à corroborer cette hypothèse ?

Nonobstant, l'intérêt des scientifiques pour les instabilités gravitaires répond à plus forte raison à une recrudescence de celles-ci : année après année le bilan s'alourdit en matière de pertes humaines et matérielles. Pour illustrer ce constat, nous prenons ci-après l'exemple de la France où nous avons relevé 56 articles consacrés aux instabilités gravitaires qui ont eu des conséquences matérielles, humaines ou pire encore les deux à la fois depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2001 avec au moins un événement par an (cf. Tableau II.1). Pour cela, nous avons consulté uniquement la rubrique spécifique à la veille des catastrophes naturelles en France disponible dans la base de données de l'observatoire permanent des CATastrophes NATurelles et des risques naturels (CATNAT) le 29 mars 2017 via ce lien ci-après : <https://www.catnat.net/>.

*Tableau II.1. Articles consacrés aux instabilités gravitaires, recensées en France depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2001 qui ont eu des conséquences matérielles et/ou humaines. Tableau réalisé à partir d'une recherche pour l'événement « mouvements de terrain » sur la base de données de l'observatoire permanent des CATastrophes NATurelles et des risques naturels (<https://www.catnat.net/>, dernière consultation en mars 2017).*

	<b>Titre des articles consacrés aux instabilités gravitaires</b>	<b>Publié le</b>
1	« Un glissement de terrain contraint à l'évacuation de 88 maisons dans l'Ain »	8 mars 2017
2	« Un important éboulement isole 3 communes et une station de ski en Isère »	8 février 2017
3	« Éboulement rocheux sur une route des Hautes-Pyrénées »	25 janvier 2017
4	« Une vingtaine de maisons touchées par un glissement de terrain en Haute-Savoie »	19 juin 2016
5	« Éboulement rocheux dans le nord de la Corse »	19 octobre 2015
6	« Glissement de terrain massif en Isère »	10 avril 2015
7	« Glissement de terrain dans le Var, 60 personnes évacuées »	6 décembre 2014
8	« Éboulement rocheux à la Réunion : 2 morts »	17 juin 2014
9	« Coulée de boue en Haute-Savoie : 2 habitations évacuées »	9 avril 2014
10	« Chute de bloc mortelle dans les Alpes du Sud : 2 morts »	23 février 2014
11	« Chute de bloc rocheux dans les Pyrénées-Atlantiques : 1 mort »	3 janvier 2014
12	« Éboulement de falaise dans le Maine-et-Loire »	21 novembre 2013
13	« 2 personnes blessées par un glissement de terrain dans les Hautes Alpes »	6 juin 2013
14	« Éboulement rocheux dans la vallée de la Tinée »	27 avril 2013
15	« Effondrement de falaise au Pays de Galles »	31 octobre 2011

Tableau II.1. (suite)

	<b>Titre des articles consacrés aux instabilités gravitaires</b>	<b>Publié le</b>
16	« Glissement de terrain à Fort-de-France (Martinique) : onze familles évacuées »	7 mai 2011
17	« Glissement de terrain dans le nord de l'agglomération Niçoise »	16 mars 2011
18	« Glissement de terrain à Revin (Ardennes) »	16 novembre 2010
19	« Glissement de terrain à Fort-de-France (Martinique) »	23 juillet 2010
20	« Important risque d'effondrement de falaise en Dordogne »	3 juin 2010
21	« Un glissement de terrain sinistre plusieurs maisons à Tonneins »	12 octobre 2009
22	« Un éboulement rocheux coupe la Corse en deux »	5 décembre 2008
23	« Éboulement rocheux à la Réunion : 1 mort »	10 janvier 2008
24	« Éboulement sur une route du Vercors : 2 morts »	3 novembre 2007
25	« Éboulement à la Réunion : 1 mort »	16 octobre 2006
26	« Important éboulement rocheux dans les Alpes-Maritimes »	23 avril 2006
27	« Éboulement meurtrier à la Réunion »	24 mars 2006
28	« Éboulement sur une route de Haute-Savoie »	11 août 2005
29	« Mouvement de terrain dans la Loire »	19 avril 2005
30	« Glissement de terrain dans l'Essonne »	23 novembre 2004
31	« Éboulement sur une route du Vercors : 2 morts »	30 janvier 2004
32	« Marnières : 2 habitations évacuées en Seine-Maritime »	9 février 2003
33	« Glissement dans l'Eure » : 2 maisons menacées »	13 janvier 2003
34	« Glissement de terrain de 80 ha dans les Alpes de Haute Provence »	24 décembre 2002
35	« Un mouvement de terrain provoque la chute d'une grue à Lourdes »	5 décembre 2002
36	« Effondrement de falaise dans les Pyrénées-Atlantiques »	3 décembre 2002
37	« Mouvement de terrain en Ardèche, 10 maisons évacuées »	29 novembre 2002
38	« Glissement de terrain en Isère »	17 novembre 2002
39	« Nouvel éboulement de falaise à Yport »	27 août 2001
40	« Éboulement dans l'Oisans »	10 août 2001
41	« Effondrement de falaise en Normandie »	4 août 2001
42	« Un pan de falaise s'effondre à Bénouville »	25 juillet 2001
43	« Éboulement dans l'Ain »	22 juillet 2001
44	« Éboulement de falaise près de Fécamp »	15 juillet 2001
45	« Éboulement rocheux à la Réunion »	23 mai 2001
46	« Un pan de falaise s'effondre sur une plage : 2 blessées »	9 mai 2001
47	« Éboulement au Pays basque »	6 mai 2001
48	« Affaisements dans la région de Cambrai »	27 avril 2001
49	« Les affaisements se multiplient dans l'Oise »	20 avril 2001
50	« Affaissement dans la région de Rouen »	10 avril 2001
51	« Chute dans une marnière : 1 mort »	31 mars 2001
52	« Des bâtiments menacés par un éboulement à Erquy »	29 mars 2001
53	« Glissement de terrain à Conflans-Ste-Honorine »	26 mars 2001

Tableau II.1. *(suite)*

	<i>Titre des articles consacrés aux instabilités gravitaires</i>	<i>Publié le</i>
54	« <i>Glissement de terrain à Feternes</i> »	18 mars 2001
55	« <i>Marseille : villas menacées par un glissement</i> »	31 janvier 2001
56	« <i>400 évacués à Menton par risque d'éboulement</i> »	12 janvier 2001

Reprenons le graphique de l'évolution de la production scientifique concernant l'ensemble des instabilités gravitaires (cf. courbe « landslide », Figure II.1). Nous observons pour 2014 et 2015, les deux dernières années de cette période, une légère régression puisque nous comptabilisons environ 300 documents produits annuellement en moins pour les années 2014 (1556 documents) et 2015 (1607 documents) par rapport à l'année 2013 (1877 documents). Il s'agit là en fait du 2<sup>e</sup> point d'inflexion notable pour l'évolution de la production scientifique sur les instabilités gravitaires. Nous pensons qu'il s'explique en partie par l'attrait grandissant des scientifiques pour les instabilités gravitaires de grandes ampleurs (DSGSD et DSL principalement). En effet, la production scientifique internationale pour les instabilités gravitaires de grandes ampleurs seules enregistre certes une évolution à partir de 2003, mais c'est réellement à partir de 2013 que celle-ci est visible (cf. courbes « DSL » & « DSGSD », Figure II.1). Nous comptabilisons au total pour cette période : 86 documents contenant le mot-clef « DSL » et 67 documents contenant le mot-clef « DSGSD ».

Par ailleurs, soulignons tout de même un attrait soudain et sporadique des scientifiques pour les instabilités gravitaires de grandes ampleurs dès la fin du XX<sup>e</sup> siècle. Nous comptabilisons sur la base de données de Scopus un document produit annuellement avec le mot-clef « DSGSD » en 1994, 1997 et 1999 (cf. courbe « DSGSD », Figure II.1). De la même manière, nous comptabilisons sur cette même base de données, un document produit annuellement avec le mot-clef « DSL » en 1988, 1990 et 1991 (cf. courbe « DSL », Figure II.1).

### **c) Pays contributeurs pour la période 1970-2015**

Ici sont présentés les pays qui ont le plus contribué à la connaissance des instabilités gravitaires pour la période 1970-2015. Nous avons réalisé trois classements distincts qui sont illustrés ci-après (cf. Figure II.2). Ces classements sont fonction du nombre de documents produits par pays (seul le pays du premier auteur de chaque document est retenu) contenant l'un des mots-clefs suivants :

- i) « landslide » pour le premier classement (cf. classement [a], Figure II.2),
- ii) « Deep-Seated Landslide » (DSL) pour le deuxième classement (cf. classement [b], Figure II.2) et

- iii) « Deep-Seated Gravitational Slope Deformation » (DSGSD) pour le troisième classement (cf. classement [c], Figure II.2).

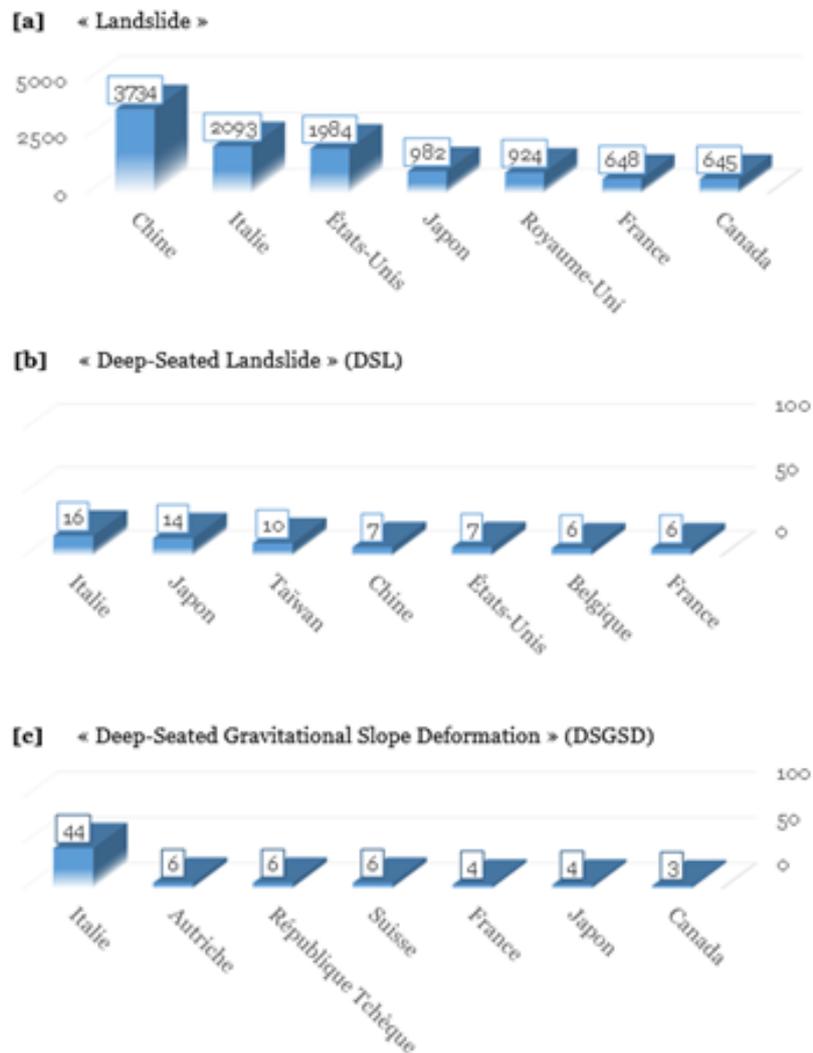


Figure II.2. Classement des sept premiers pays contributeurs pour la période 1970-2015 en fonction du nombre de documents contenant les mots-clefs [a] « Landslide », [b] « Deep-Seated Landslide » (DSL) et [c] « Deep-Seated Gravitational Slope Deformation » (DSGSD). Illustration réalisée à partir d'une recherche par mots-clefs effectuée avec la base de données de Scopus (<https://www.elsevier.com/solutions/scopus>, dernière consultation en juillet 2016). Cf. Choix de la base de données et des critères pour le choix des domaines thématiques et des indicateurs bibliométriques.

Pour ce qui est de la production scientifique internationale sur l'ensemble des instabilités gravitaires, c'est la Chine qui contribue le plus pour la période considérée avec 3734 documents contenant le mot-clef « landslide » (cf. classement [a], Figure II.2). La raison semble évidente. D'après la base de données de l'observatoire permanent CATNAT, la plupart des instabilités gravitaires les plus destructrices et meurtrières ont eu lieu dans ce pays (<https://www.catnat.net/>, mars 2017). Par exemple, le dernier glissement de terrain le plus dévastateur en Chine selon cet observatoire a eu lieu le 26 mai 2015 : un pan de montagne s'est détaché après des pluies violentes pour englober le village en contre bas et causer plus d'une centaine de morts.

Pour information, la France quant à elle se place en 6e position sur le rang mondial avec 648 documents pour cette période (cf. classement [a], Figure II.2). Elle se trouve derrière l'Italie, les États-Unis, le Japon et le Royaume-Uni qui sont respectivement à la 2e place avec 2093 documents, 3e place avec 1984 documents, 4e place avec 982 documents et 5e place avec 924 documents (cf. classement [a], Figure II.2).

Concernant les instabilités gravitaires de grandes ampleurs, c'est l'Italie qui contribue le plus avec 16 documents pour les DSL (cf. classement [b], Figure II.2) et 44 documents pour les DSGSD (cf. classement [c], Figure II.2). La France occupe la 5e place avec la Belgique pour ce qui est de la contribution pour les DSL (cf. classement [b], Figure II.2) et elle occupe la 3e place avec le Japon pour les DSGSD (cf. classement [c], Figure II.2). Ce qu'il faut retenir de ce comptage, c'est la remarque suivante : ce sont les pays européens qui dominent le sujet du « DSGSD ». Cela conditionne a fortiori les propos qui vont suivre, notamment sur la distribution géographique de ces instabilités gravitaires de grandes ampleurs (cf. partie II.1.2).

#### **d) Limites de cette macro analyse et remarques**

Cette macro analyse de l'état de la recherche scientifique sur les instabilités gravitaires de grandes ampleurs entre 1970 et 2015 a ses limites en raison des deux principales remarques qui suivent.

Premièrement, nous n'utilisons qu'une seule base de données de publications (Scopus d'Elsevier), ce qui suggère que nous n'avons qu'une vision partielle de la production scientifique et de surcroît un manque de visibilité. Rajoutons que celle-ci est en cours de développement ; les chiffres annoncés ici sont donc susceptibles d'évoluer.

En France par exemple, les thèses de doctorat suivantes apportent une contribution évidente pour la communauté scientifique qui s'intéressent aux instabilités gravitaires de grandes ampleurs, mais nous constatons qu'elles ne sont pas référencées dans cette base de

données ; la contribution est donc très souvent partielle, car elle ne présente souvent au mieux que des articles connexes :

- « Modélisation physique tridimensionnelle des mouvements gravitaires de grande ampleur en milieu rocheux » de Damien Bachmann soutenue publiquement le 1<sup>er</sup> décembre 2006 à Nice ;
- « Analyse multi-échelles des déformations gravitaires du Massif de l'Argentera Mercantour » d'Hervé Jomard soutenue publiquement le 11 décembre 2006 à Nice ;
- « Étude du rôle des hétérogénéités structurales et de l'altération sur la déstabilisation des massifs rocheux par une approche couplée de modélisation physique et numérique » de Thomas Bois soutenue en 2010 à Nice ;
- « Évolution thermomécanique du mouvement de Séchilienne depuis la dernière phase glaciaire quaternaire » de Vincent Lebrouc soutenue en 2013 à Grenoble ;
- « Analyse et modélisation des interactions géomécaniques entre tunnels et versants instables » de Lionel Causse soutenue publiquement le 14 avril 2015 à Paris ;
- « Origine et évolution des ruptures gravitaires de grande ampleur dans les chaînes subalpines méridionales à l'Holocène : contraintes géomorphologiques, géochronologiques et géophysiques » de Swann Zerathe soutenue publiquement le 2 juillet 2013 à Nice ;
- « Étude du comportement post-rupture de versants instables par l'observation et l'instrumentation » d'Édouard Palis soutenue publiquement le 20 mars 2017 à Nice (nous la rajoutons à titre d'information puisque la macro analyse présentée ci-avant considère seulement les années entre 1970 et 2015).

Deuxièmement, il est évident qu'une évolution amène incontestablement des avis partagés. Les hypothèses faites sont soit admises ou soit réfutées par la communauté scientifique et très souvent controversées. Pour le « Deep-Seated Gravitational Slope Deformation » (DSGSD), certaines hypothèses restent discutées : nous revenons d'ailleurs sur ce point dans la suite de ce travail (cf. partie II.1.2). Ainsi, d'autres appellations, autres que DSGSD, ont été utilisées par les scientifiques au XX<sup>e</sup> siècle pour nommer les instabilités gravitaires de grandes amplitudes, puisque les hypothèses faites différaient selon les scientifiques. Nous citerons principalement les suivantes : « sackung » (Zischinsky, 1966, 1969), « deep creep of slopes » (Ter-Stepanian, 1966, 1977), « gravity faulting » (Beck, 1968), « gravitational slope deformations » (Nemčok, 1972a), « gravitational block-type movements » (Pašek, 1974), « gravitational spreading » (Radbruch-Hall et al., 1976), « deep-reaching gravitational deformation » (Mahr, 1977), « deep-seated creep deformations » (Mahr & Nemčok, 1977) et « gravitational creep » (Radbruch-Hall, 1978). Nous n'avons tout pas intégré ces mots-clés dans cette macro analyse.

Nous retiendrons tout de même de cette macro analyse qu'il existe depuis peu un attrait indiscutable de la communauté scientifique pour les instabilités gravitaires de grandes ampleurs ; la prise de conscience générale du rôle que peut jouer un DSGSD dans un mouvement de versant est fondamentale (cf. partie II.1.1.3) et les scientifiques l'ont compris.

### II.1.1.2 Critique sur les classifications

Nous constatons qu'il existe dans la littérature scientifique un nombre considérable de classifications pour les instabilités gravitaires, en tenant compte des mises à jour de chacune, qui permettent d'orienter le scientifique quand il doit définir le mouvement de masse qu'il étudie ou auquel il est confronté pour prendre les dispositions adéquates. Nous citerons pour l'exemple : Varnes (1958, 1978), Nemčok et al. (1972b), Colas & Pilot (1976), Millies-Lacroix (1981), Hutchinson (1988), Flageolet (1989), Antoine & Giraud (1995), Cruden & Varnes (1996), Yagi (2003), Hungr et al. (2014), etc. L'intérêt n'étant pas, ici, d'en faire une liste exhaustive, retenons :

- i) qu'elles diffèrent principalement les unes des autres selon les critères de reconnaissance que leurs auteurs utilisent (à savoir la géologie, la géomorphologie, la cinématique et la dynamique essentiellement) et
- ii) que le « Deep-Seated Gravitational Slope Deformation » (DSGSD), la plus importante instabilité gravitaire de grande ampleur reconnue par la communauté scientifique, n'est pas clairement présente.

Prenons l'exemple de la classification de Varnes (1978), illustrée ci-après (cf. Figure II.3) puisque c'est celle qui est la plus communément utilisée que ce soit dans le milieu scientifique ou celui de l'ingénierie. Elle présente dans sa version de 1978 (cf. Figure II.3), les mouvements de masse élémentaires en fonction du type de mouvement (la chute, le basculement, le glissement, l'étalement latéral ou l'écoulement) et de la nature du matériau affecté (le substratum rocheux, les sols principalement grossiers ou les sols principalement fins) ; notons que dans la version de 1958, les types de mouvement basculement et étalement latéraux ne sont pas présentés.

Il est précisé également dans la classification de Varnes (1978) qu'une combinaison d'au moins deux types de mouvements de masse élémentaires est plausible (cf. Figure II.3). Elle est surtout selon Cruden & Varnes (1996) plus fréquente dans la nature. Cette combinaison de mouvements de masse élémentaires c'est en fait l'essence même d'un mouvement complexe : les mouvements élémentaires concernés sont soit successifs soit simultanés. Autrement dit, il y a respectivement soit une combinaison dans le temps d'au moins deux mouvements de masse élémentaires soit une combinaison dans l'espace d'au moins deux mouvements de masse

élémentaires. Forno et al. (2013) constatent cependant que la distinction entre les deux, combinaison temporelle ou spatiale, n'est d'ailleurs pas toujours aisée sur le terrain. C'est pourquoi Hungr et al. (2014) nous rappelle qu'il est préférable d'utiliser la dénomination seule de « mouvement complexe ».

Type de mouvement			Type de matériaux		
			Substratum rocheux	Sols	
				Principalement grossiers	Principalement fins
 <b>Chutes</b>			Écroulement rocheux	Écroulement de débris	Écroulement de terrain
 <b>Basculements</b>			Basculement rocheux	Basculement de débris	Basculement de terrain
 <b>Glissements</b>	Rotation	Peu d'unités	Affaissement rocheux	Affaissement de débris	Affaissement de terrain
	Translation		Masse rocheuse en glissement	Débris en glissement	Terrain en glissement
			Unités multiples	Glissement rocheux	Glissement de débris
 <b>Étalements latéraux</b>			Étalement de roches	Étalement de débris	Étalement de terrain
 <b>Écoulements</b>			Avalanche de roches	Lave torrentielle	Coulée de terrain
<b>Complexes</b>			Combinaison de deux ou plusieurs types de mouvements principaux		

Figure II.3. Classification simplifiée de Varnes (1978 ; traduite) avec les représentations schématiques des types de mouvement (dessinées par Cruden & Varnes, 1996 in Hungr et al., 2014).

Comme le DSGSD n'y figure pas, la plupart des scientifiques s'essayent donc à une combinaison de mouvements de masses élémentaires pour le définir. Par exemple, Bachmann (2006), Jomard (2006) et Bois (2010) qui dans leurs travaux de thèse combinent l'écoulement et l'étalement latéral d'un substratum rocheux ; toutefois, ils ne précisent pas si cette combinaison est temporelle ou spatiale, mais rappelons-le, la distinction sur le terrain n'est pas aisée. D'autres scientifiques préfèrent réactualiser la classification de Varnes (la version complète de 1978) en la jugeant imparfaite, sous-entendue qu'elle ne prend pas en compte les progrès récents dans la compréhension des instabilités gravitaires : Hungr et al. (2014) proposent par exemple, d'ajouter un nouveau type de mouvement élémentaire, « moutain slope deformation » que nous traduisons littéralement par « déformation d'un versant montagneux », dans lequel serait le DSGSD sans pour autant qu'il soit nommé explicitement.

### II.1.1.3 Risque naturel

Heim (1932) considérait les déformations profondes de massifs montagneux comme des signes précurseurs d'un danger imminent, notamment l'avalanche de débris associée au glissement de terrain de Val Pola en Italie (Crosta et al, 2004). Ces derniers confirment qu'il avait raison. En effet, le DSGSD n'est pas considéré comme un phénomène dangereux, car il évolue très lentement avec des déformations très faibles sur une décennie (cf. partie II.1.2), mais il ne doit pas pour autant être négligé : sa présence doit être selon Coltorti et al. (1985) et Hewitt et al. (2008) prise en compte de manière adéquate dans l'évaluation des risques.

Le DSGSD peut provoquer des événements secondaires précurseurs plus catastrophiques tels que des chutes de roches, des avalanches rocheuses et des glissements rocheux comme le précisent et l'illustrent de nombreux scientifiques : Crosta et al. (2004) ; Di Luzio et al. (2004) ; Jarman (2006) ; Boulton et al. (2006) ; Hewitt et al. (2008) ; Chigira (2009) ; Jaboyedoff et al. (2009) ; Pánek et al. (2009a, 2011a, 2013) ; Chigira et al. (2010, 2013) ; Esposito et al. (2013) ; Pedrazzini et al. (2013) ; Ballantyne et al. (2014) ; Barth (2014) ; Bianchi Fasani et al. (2014) ; etc.

Ces événements sont susceptibles de se produire soudainement et :

- i) d'endommager les infrastructures (Ambrosi & Crosta, 2006 ; Causse, 2015) aériennes et souterraines telles que les voies ferrées, les tunnels, les annexes des usines hydroélectriques (barrages, galeries drainantes et conduites forcées) ou des habitations ;
- ii) et de mettre surtout en danger l'Homme (Chigira et al., 2010).

À l'échelle mondiale, au moins dix-huit avalanches rocheuses et glissements rocheux associés spatialement à un DSGSD ont été décrits et ont eu des conséquences dramatiques (cf. Tableau II.2). Pollet (2004) dénombre des pertes humaines substantielles pour ces évènements historiques, avec par exemple : au Canada, plus de 70 victimes pour Frank le 29 avril 1903 (Benko & Stead, 1998 ; Cruden & Martin, 2007) ; en Italie, environ 2000 victimes pour Vaiont le 9 octobre 1963 (au niveau du célèbre barrage Vajont ; Paronuzzi & Bolla, 2012) et aussi quelques décennies plus tard, 27 victimes pour Val Pola le 28 juillet 1987 (Crosta et al, 2004).

*Tableau II.2. Les avalanches rocheuses et les glissements rocheux les plus catastrophiques depuis le début du XXe siècle spatialement associés à une instabilité gravitaire de grande ampleur du type DSGSD d'après Pánek & Klimeš (2016).*

	<i>Nom</i>	<i>Année</i>	<i>Pays</i>	<i>Référence</i>
1	<i>Frank</i>	1903	Canada	Cruden & Martin (2007)
2	<i>Tafford</i>	1934	Norvège	Blikra et al. (2006)
3	<i>Vaiont</i>	1963	Italie	Paronuzzi & Bolla (2012)
4	<i>Hope</i>	1965	Canada	Brideau et al. (2005)
5	<i>Devastation Creek</i>	1975	Canada	Holm et al. (2004)
6	<i>Val Pola</i>	1987	Italie	Crosta et al. (2004)
7	<i>East Gate</i>	1997	Canada	Brideau et al. (2006)
8	<i>Tsaoling</i>	1999	Taïwan	Chigira et al. (2003)
9	<i>Chiu-fen-erh-shan</i>	1999	Taïwan	Wang et al. (2003)
10	<i>Yigong</i>	2000	Chine	Zhou et al. (2016)
11	<i>Zymoetz River</i>	2002	Canada	Boulton et al. (2006)
12	<i>Pink Mountain</i>	2002	Canada	Geertsema et al. (2006)
13	<i>Aresawa</i>	2004	Japon	Nishii et al. (2013)
14	<i>Nonoo</i>	2005	Japon	Chigira (2009)
15	<i>Todagin Creek</i>	2006	Canada	Sakals et al. (2012)
16	<i>Young River</i>	2007	Nouvelle-Zélande	Massey et al. (2013)
17	<i>Daguanbao</i>	2008	Chine	Chigira et al. (2010)
18	<i>Guanling</i>	2010	Chine	Yin et al. (2011)

Pánek & Klimeš (2016) précisent que certains mouvements catastrophiques n'ont cependant pas de déclencheur évident comme un séisme, de fortes pluies ou une fonte rapide du manteau neigeux, ce qui suggère la capacité d'un DSGSD à prédisposer le versant à l'instabilité et initier à lui seul un mouvement de masse aux conséquences dramatiques. Cette remarque a aussi été suggérée quelques années plus tôt par Capitani et al. (2013) : les résultats de leur analyse statistique conditionnelle menée dans le bassin Milia de la région de Toscane

en Italie, présentés sous forme de cartes de susceptibilité, indiquent que les DSGSD affectent et influencent de manière significative la distribution des glissements de terrain.

Le DSGSD est donc un risque naturel (Dramis & Sorriso-Valvo, 1994) qui laisse dans une moindre mesure selon Korup (2006) et Agliardi et al. (2013) une forte empreinte géomorphologique. La prise de conscience du rôle que peut jouer un DSGSD dans un mouvement de versant est donc fondamentale. Aussi, les mesures d'atténuation prises pour un mouvement de masse isolé dans le même versant, sans tenir compte de l'influence du DSGSD qui l'englobe, peuvent être incomplètes et inefficaces à long terme (Soldati, 2013).

## **II.1.2 « DEEP-SEATED GRAVITATIONAL SLOPE DEFORMATION » (DSGSD)**

Nous présentons au préalable la définition et la terminologie du « Deep-Seated Gravitational Slope Deformation » (cf. partie II.1.2.1), puis sa distribution géographique (cf. partie II.1.2.2), sa probabilité d'occurrence (cf. partie II.1.2.3) ainsi que ses caractéristiques typiques (cf. partie II.1.2.4) et enfin les types et mécanismes qui les conditionne (cf. partie II.1.2.5).

### **II.1.2.1 Définition et terminologie**

Le « Deep-Seated Gravitational Slope Deformation » (DSGSD) est un terme utilisé pour nommer un mouvement de masse lent et profond affectant le substratum rocheux d'un versant montagneux (Pánek & Klimeš, 2016). Remarquons que Crosta & Zanchi (2000) le qualifient comme beaucoup de scientifiques, de phénomène physique complexe impressionnant, extraordinaire et énigmatique. Soldati (2013) le définit, dans l'encyclopédie des risques naturels, comme un mouvement de masse qui :

- i) résulte de la gravité,
- ii) affecte de grandes portions de versant,
- iii) évolue sur de très longues périodes de temps et
- iv) déplace des volumes de roche conséquents (jusqu'à des centaines de millions de mètres cubes).

Le terme « Deep-Seated Gravitational Slope Deformation » a été utilisé pour la première fois par Malgot (1977) pour décrire la déformation profonde d'un versant qui résulte de la gravité dans les Carpates occidentales en Slovaquie ; la notion temporelle de la définition a ensuite été précisée par Nemčok (1977, 1982) qui distingue selon les caractéristiques visibles en surface différents stades de déformations initiaux et avancés (cf. Figure II.4). L'acronyme anglophone DSGSD a été introduit quant à lui un peu plus tard, notamment par

Dramis & Sorriso-Valvo (1994), mais précisons que ce terme a été popularisé surtout par Agliardi et al. (2001).

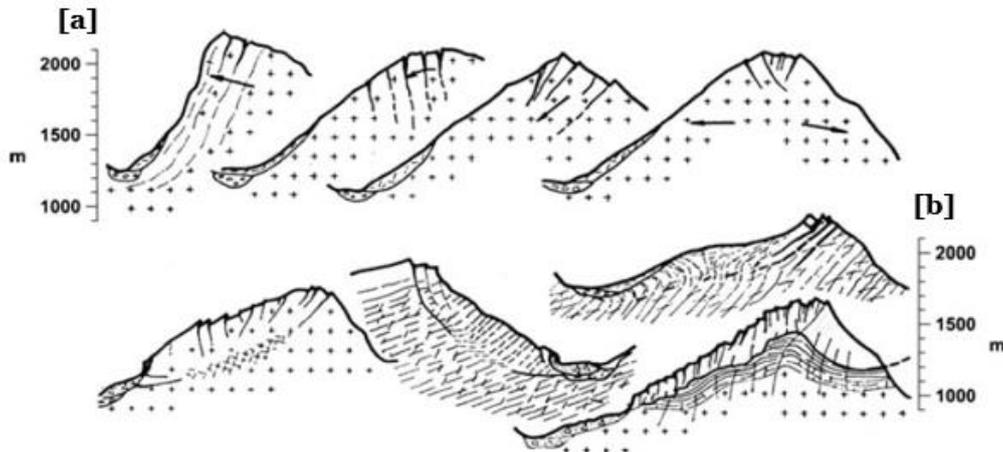


Figure II.4. Stades de déformation d'un DSGSD dans les Carpates Slovaques d'après Nemčok (1977, 1982) in Hungr et al. (2014) : [a] stades de déformation initiaux et [b] stades de déformation avancés.

### II.1.2.2 Distribution géographique

De nombreuses études de cas de DSGSD ont été recensées par Pánek (2015) et Pánek & Klimeš (2016) un peu partout dans les régions les plus élevées de la planète, qu'il s'agisse de DSGSD cartographiés, datés ou encore de DSGSD surveillés (cf. Figure II.5). Ces régions sont :

- i) l'Alaska, avec les chaînes côtières du Pacifique, celles des Rocheuses, des Appalaches et la cordillère des Andes pour l'Amérique ;
- ii) les Highlands d'Écosse, les Alpes européennes et scandinaves, les Pyrénées, les Apennins et les Carpates pour l'Europe ;
- iii) les hauts plateaux d'Éthiopie pour l'Afrique ;
- iv) l'Himalaya, le Chungyang et les Alpes japonaises pour l'Asie ;
- v) et les Alpes du sud en nouvelle Zélande pour l'Océanie.

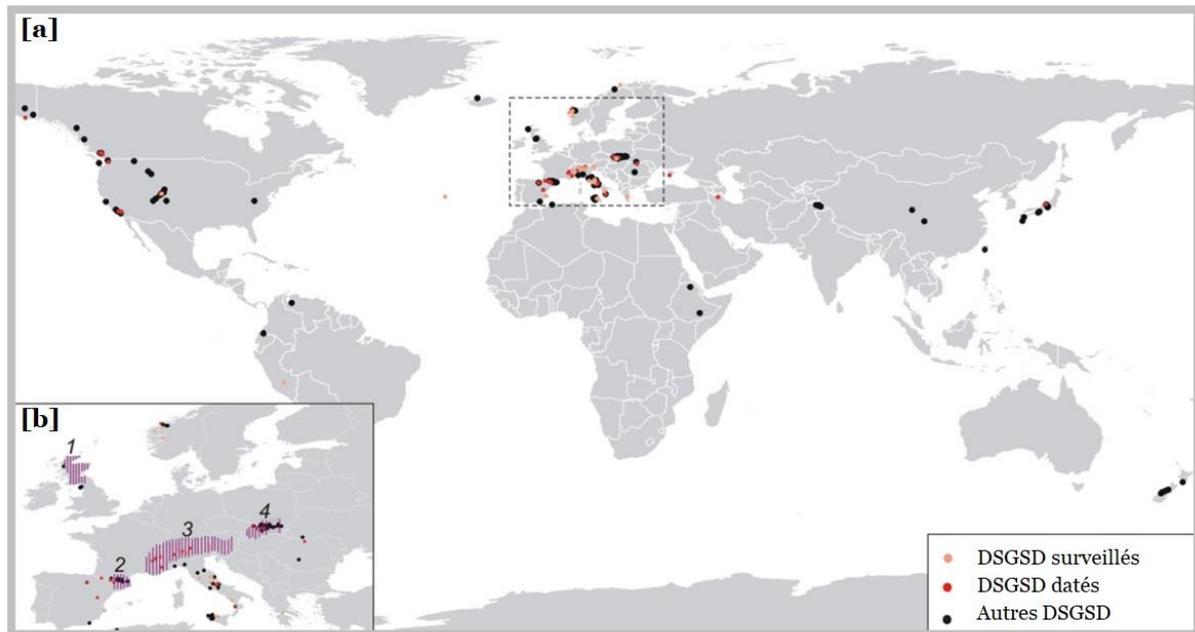


Figure II.5. Répartition des instabilités gravitaires de grandes ampleurs du type DSGSD d'après Pánek & Klimeš (2016 ; illustration traduite) : [a] contexte mondial et [b] vue détaillée de l'Europe. Les régions hachurées et numérotées contiennent d'importantes bases de données : [b-1] les Highlands écossaises (Jarman, 2006) ; [b-2] les Pyrénées orientales (Jarman et al., 2014) ; [b-3] les Alpes européennes (Crosta et al., 2013) ; [b-4] les Carpates occidentales (Alexandrowicz & Alexandrowicz, 1988).

Nous constatons que les DSGSD ont été reconnus le plus souvent dans les régions montagneuses autrefois glaciaires (Bovis & Evans, 1995 ; Gutiérrez-Santolalla et al., 2005 ; Hürlimann et al., 2006 ; Sakals et al., 2012 ; Crosta et al., 2013 ; Barth, 2014 ; Jarman et al., 2014 ; etc.), mais aussi dans les régions montagneuses qui n'ont pas été affectées par les glaciers (Berardino et al., 2003 ; Rizzo & Leggeri, 2004 ; Pánek et al., 2009b ; Baroň et al., 2013 ; Mège et al., 2013 ; Tolomei et al., 2013 ; Bianchi Fasani et al., 2014 ; Di Maggio et al., 2014 ; Hou et al., 2014 ; McLean et al., 2015 ; etc.). Notons également que des instabilités gravitaires de grandes ampleurs du type DSGSD ont aussi été identifiées sur la planète Mars (Mège & Bourgeois, 2011 ; Gullini et al., 2012), où le relief est en fait suffisamment élevé pour qu'ils s'y développent.

Précisons que les premiers inventaires de DSGSD à l'échelle orogénique ont d'abord été faits dans les Alpes européennes par Crosta et al. (2008), Agliardi et al. (2012, 2013), Crosta et al. (2013). Ces scientifiques ont identifié 1033 DSGSD (cf. Figure II.5b). Cet inventaire régional

des DSGSD a permis à Crosta et al. (2013) d'apporter des informations sur la distribution spatiale des DSGSD et d'expliquer leurs étroites relations avec les structures géologiques existantes et les processus néotectoniques qui les ont favorisés.

### II.1.2.3 Probabilité d'occurrence

La première condition pour qu'un DSGSD puisse se développer dans une chaîne de montagnes est l'existence d'un relief vertical atteignant une hauteur de l'ordre d'un kilomètre ou plus. Pour les Alpes européennes par exemple, Agliardi et al. (2013) précisent qu'un DSGSD se développe généralement dans les roches fortement anisotropes de la zone axiale (cf. Figure II.6).

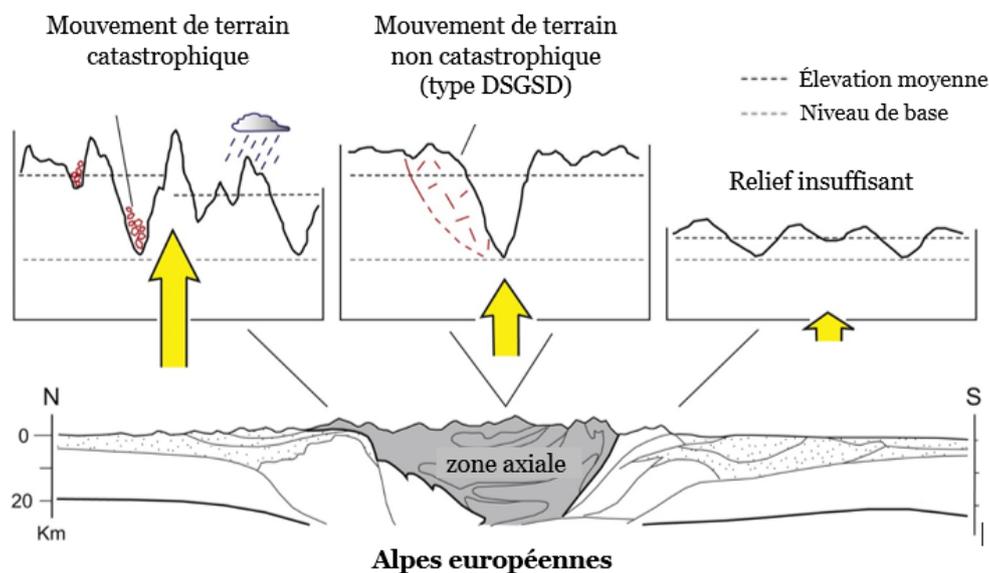


Figure II.6. Conditions topographiques d'occurrences d'un mouvement de terrain catastrophique et d'un mouvement de terrain non catastrophique de type DSGSD dans les Alpes européennes d'après Agliardi et al. (2013 ; illustration traduite et simplifiée).

La probabilité d'occurrence spatiale et temporelle d'un DSGSD est conditionnée par des facteurs de prédisposition ou de susceptibilité (issus d'un héritage mécanique) et des facteurs déclenchant naturels (l'eau ou les séismes) qui peuvent être dans une moindre mesure aggravants.

Le DSGSD est contrôlé par des structures géologiques créant des discontinuités au sein du massif rocheux telles que les failles, les fractures, les axes de plis hectométriques à

kilométriques, les plans de stratification des roches sédimentaires et les plans de schistosité ou de foliations des roches métamorphiques (Agliardi et al., 2001, 2009a ; Pánek et al., 2011b), qui présentent une orientation favorable à la déstabilisation progressive du versant montagneux.

Comme l'expliquent les auteurs suivants, Košťák & Avramova-Tačeva (1981), Dramis & Sorisso-Valvo (1983, 1994), Bisci et al. (1996), Agliardi et al. (2001), Gutiérrez et al. (2008), Ambrosi & Crosta (2011), Coquin et al. (2015), pour Pánek & Klimeš (2016), l'occurrence d'un DSGSD est essentiellement liée au changement de l'état de contrainte dans le massif dû à :

- i) la présence de discontinuités d'origine tectonique,
- ii) la relaxation postglaciaire des massifs rocheux suite au retrait des glaciers pour les régions montagneuses concernées,
- iii) l'activité sismique.

Précisons que les séismes peuvent en effet initier un DSGSD (Jibson et al., 2004), mais aussi accélérer son évolution (Moro et al., 2007) ce qui explique le nombre significatif de DSGSD près des failles actives pour Pánek & Klimeš (2016).

Certaines études montrent aussi, comme le rapportent Pánek & Klimeš (2016), que la karstification de calcaire (Pánek et al., 2009b ; Apuani & Corazzato, 2009, Lenti et al., 2012) et même la dissolution d'évaporites (Carbonel et al., 2013) peuvent jouer également un rôle prépondérant.

#### **II.1.2.4 Caractéristiques typiques**

Le DSGSD a une taille comparable à celle d'un versant entier de montagne avec un dénivelé proche ou supérieur à un kilomètre. Il s'exprime en surface selon Agliardi et al. (2001, 2012) par la présence de caractéristiques morphostructurales typiques (cf. Figure II.7), qui sont bien visibles sur le terrain selon le stade d'évolution (cf. Figure II.4), à savoir :

- i) une double-crête,
- ii) des escarpements synthétiques traduisant le résultat du rejet vers l'aval d'un compartiment rocheux,
- iii) des escarpements antithétiques (contre-pentes),
- iv) des crevasses linéaires et souvent profondes ou des grabens,
- v) un pied de versant bombé qui présente une forme convexe particulière.

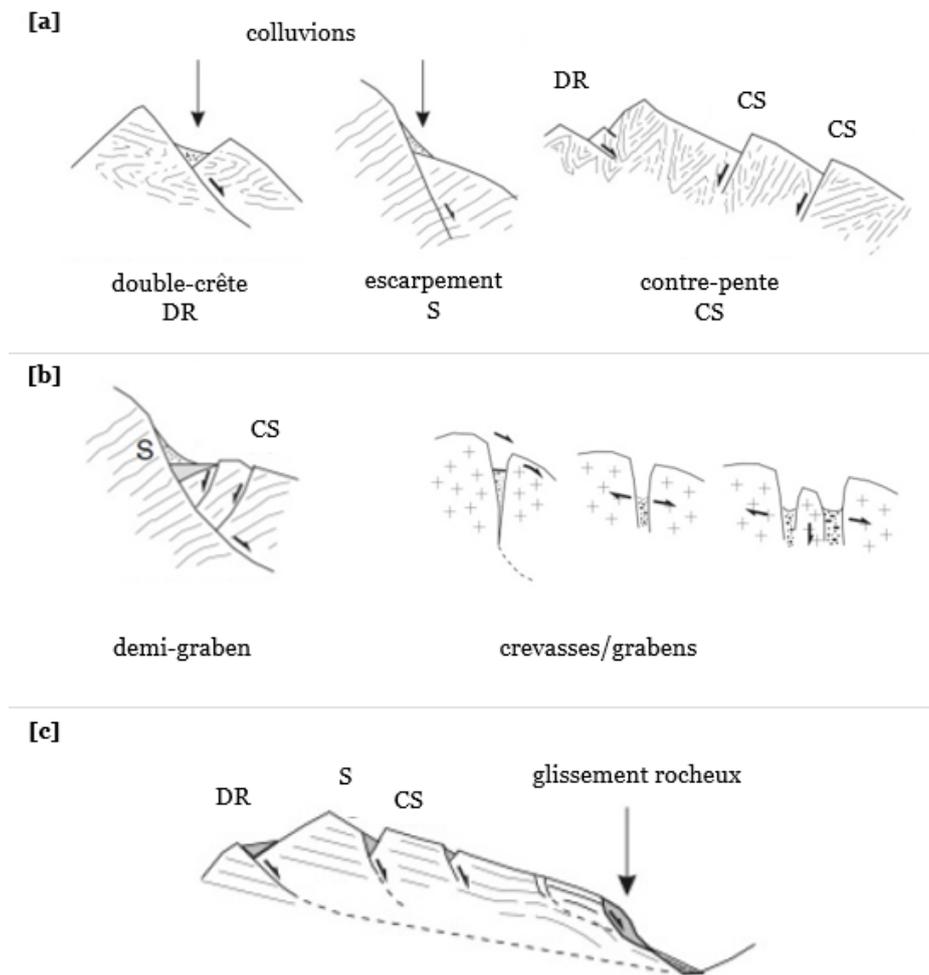


Figure II.7. Caractéristiques morphostructurales typiques d'un DSGSD d'après Agliardi et al. (2001, 2012 ; illustration traduite et modifiée) : [a] morphostructures primaires ; [b] morphostructures secondaires ; [c] associations de morphostructures possibles.

La présence de mouvements de terrain moins spectaculaires, actifs ou fossiles (paléoglisserment) comme un glissement rocheux par exemple, dans la partie intermédiaire et/ou la partie inférieure du versant affecté par un DSGSD est un argument avancé par Agliardi et al. (2001) pour suspecter sa présence (cf. Figure II.7c).

Le DSGSD présente en surface des vitesses de déplacement extrêmement lentes ou non mesurables (Hungry et al., 2014), de l'ordre du mm/an dans les Alpes européennes par exemple (Agliardi et al., 2001). Moser (1996) et Pánek & Klimeš (2016) précisent que les vitesses de déplacements sont cependant variables dans le temps et dans l'espace (cf. partie II.1.3).

Le DSGSD manque surtout de limites clairement définies en profondeur (Agliardi et al., 2001, 2012 ; Crosta et al., 2013). Les déplacements liés aux DSGSD se produisent dans une zone de déformation où le massif rocheux serait fortement affecté par des microfractures (Radbruch-Hall, 1978). Agliardi et al. (2001) précisent toutefois que l'absence d'une surface de cisaillement clairement établie dans le versant n'est pas une preuve suffisante pour dire qu'il s'agit d'un DSGSD tandis que Dramis & Sorriso-Valvo (1994) suggèrent l'inverse.

Ainsi pour Soldati (2013) la principale caractéristique qui distingue le DSGSD d'un glissement rocheux profond (« Deep-Seated Landslide », DSL), est l'absence d'une surface de rupture continue bien définie pour un DSGSD, puisque selon Terzaghi (1950) un glissement rocheux se produit le long d'un plan de cisaillement bien défini lorsque les conditions de contraintes de rupture sont satisfaites. Différencier un DSGSD d'un DSL reste difficile en surface (Crosta et al., 2013), mais un DSL présente généralement un escarpement principal plus prononcé, un plus petit rapport entre largeur et longueur, et une déstructuration interne beaucoup plus importante (Agliardi et al., 2012).

La synthèse des travaux de ces auteurs (Agliardi et al., 2001 ; Crosta et al., 2013 ; Pánek & Klimeš, 2016) tend à montrer que les DSL sont des phénomènes d'instabilité d'un versant montagneux bien identifiables géomorphologiquement (double-crête, crevasses, bombement en pied de versant, surface de rupture visible), alors que la délimitation et l'identification d'un DSGSD restent plus délicates et difficiles à délimiter par sa taille et le fait qu'il affecte le plus souvent la totalité d'un versant rocheux, sans qu'il y ait possibilité d'y trouver la zone de rupture sinon très profondément. Une manière simplificatrice de comparer et localiser un DSL par rapport à un DSGSD dans un versant montagneux instable serait de dire que les DSL sont contenus dans un DSGSD, et qu'ils sont la preuve de l'existence d'un DSGSD.

Dans la suite de nos travaux de recherche au niveau du glissement de la Cristallère reconnu par Lebourg et al. (2014), en rive gauche de la haute vallée d'Aspe (Pyrénées-Atlantiques), cette problématique entre DSL et DSGSD va se poser. Nous tenterons d'y répondre en apportant tous les arguments en faveur de l'un (type DSL) ou de l'autre phénomène (type DSGSD) (cf. partie IV. Résultats et discussion).

#### **II.1.2.5 Types et mécanismes**

Il existe une grande variété d'instabilités gravitaires de grandes ampleurs pouvant affecter un versant montagneux instable (Agliardi et al., 2012) comme le montrent ci-après les principaux schémas des scientifiques sur le sujet (cf. Figure II.8).

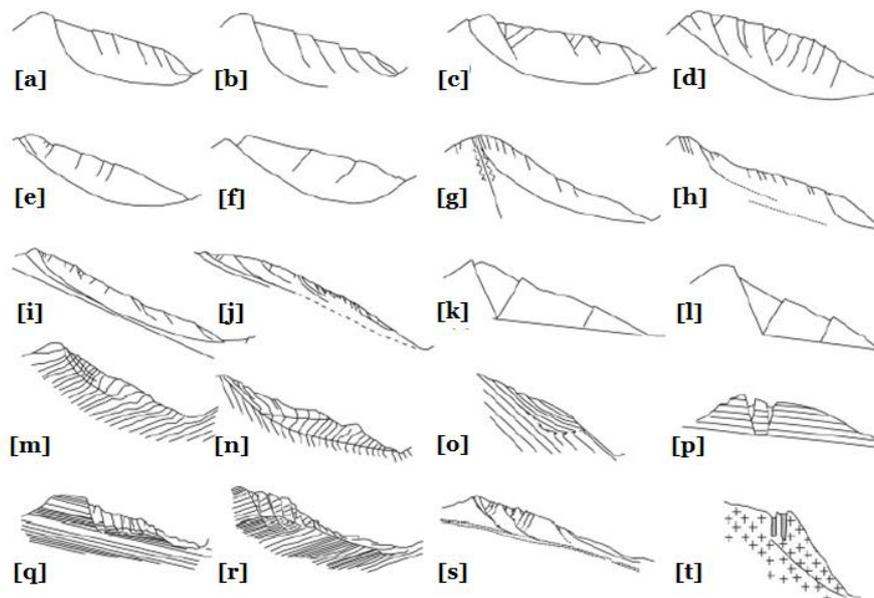


Figure II.8. Variété de déformations d'un versant instable proposée dans la littérature scientifique d'après Agliardi et al. (2012) : [a], [b], [c], [f] Bois et al. (2008) ; [d] Mahr (1977) ; [e], [g], [h], [i] Ambrosi & Crosta (2006) ; [j] Agliardi et al. (2001) ; [k], [l] Hutchinson (1988) ; [m], [n] Zischinsky (1966) ; [o], [p], [t] Chigira (1992) ; [q], [r] Nemčok (1972a) ; [s] Agliardi et al. (2009a).

Deux principaux types de DSGSD sont aujourd'hui le plus souvent décrits puisque ce sont les plus courants : le DSGSD de type « sackung » (cf. Figure II.9) et le DSGSD de type « lateral spreading » (cf. Figure II.10).

#### a) DSGSD type « sackung »

C'est le DSGSD le plus représentatif (Pánek & Klimeš, 2016). Il correspond à l'affaissement d'un versant lié à une déformation viscoplastique se produisant en profondeur (Zischinsky, 1966, 1969). Les travaux de Bachmann (2006), Bois et al. (2008), Bachmann et al. (2009), Bois (2010), Discenza et al. (2011), Bois et al. (2012) notamment ont permis d'apporter des informations précieuses sur la mécanique de ce DSGSD à partir de la modélisation physique (analogique) et numérique.

Les massifs rocheux homogènes composés de roches métamorphiques, magmatiques et sédimentaires (Agliardi et al., 2012) caractérisés par un comportement mécanique fragile en surface (cassant) sont généralement affectés par ce type de DSGSD. Précisons que le

développement du type « sackung » dépend du comportement du massif rocheux en profondeur qui est en fait complètement différent de celui de surface, puisque la température et la pression de confinement y sont plus élevées.

Deux principaux modèles de déplacements des DSGSD de type « sackung » ont été proposés (Soldati, 2013) :

- i) le modèle dans lequel on suppose qu'une pression de confinement élevée en profondeur dans le massif permet des déformations visqueuses au niveau de la partie centrale du versant (cf. Figure II.8d) ; il s'agit du modèle proposé par Mahr (1977) ;
- ii) le modèle dans lequel on considère que la zone de déformation centrale du DSGSD intercepte une surface de cisaillement bien définie située au pied du versant (modèle de rupture plastique), où la pression de confinement est moins élevée (cf. Figure II.9b) ; il s'agit du modèle défini par Savage & Varnes (1987) qui est de plus en plus admis par la communauté scientifique (Agliardi et al., 2001 ; Pánek & Klimeš, 2016).

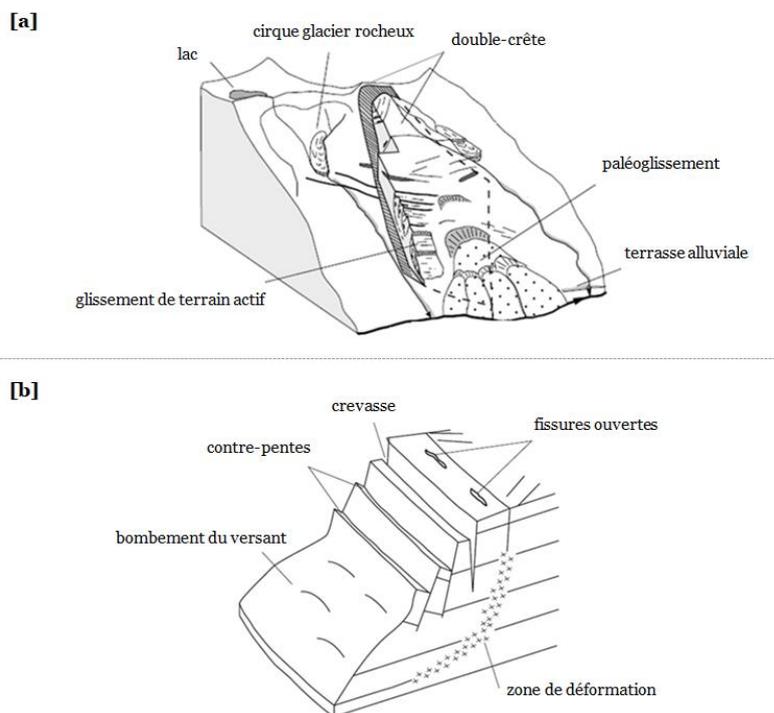


Figure II.9. DSGSD type « sackung » d'après : [a] Agliardi et al. (2001) ; [b] Bisci et al. (1996) in Soldati (2013).

Un exemple remarquable se trouve dans la partie occidentale du massif de l'Argentera-Mercantour des Alpes françaises. Il s'agit du DSGSD de Colle-Longue développé dans des roches métamorphiques qui intègre le DSL de la Clapière en pied de versant. Ce dernier, profond et actif, fait l'objet d'une surveillance active depuis 1970 (Jomard, 2006 ; Guglielmi & Cappa, 2010 ; Lebourg et al., 2011 ; Jomard et al., 2014).

### b) DSGSD type « lateral spreading »

Le DSGSD de déformation de type « lateral spreading » correspond à un étalement rocheux latéral se produisant le long de fractures de cisaillement ou de traction se situant à la base du massif rocheux. Dans ce cas Pasuto & Soldati (1996) distinguent deux types de modèles selon les conditions géologiques suivantes.

Dans le premier cas, le massif rocheux est homogène et généralement fragile (cf. Figure II.10a). Le DSGSD se produit sans la présence d'une surface de cisaillement bien définie ni même d'une zone viscoplastique reconnue. La présence de discontinuités tectoniques est considérée comme un facteur prédisposant, mais dans ce cas la mécanique de la déformation n'est pas encore bien comprise (Soldati, 2013).

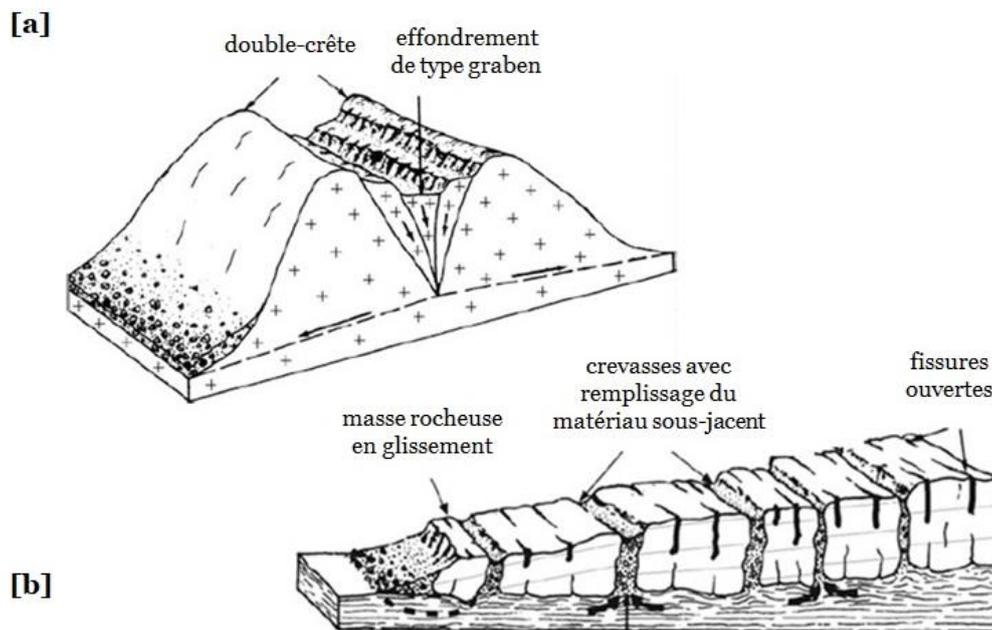


Figure II.10. DSGSD type « lateral spreading » d'après Pasuto & Soldati (1996) in Soldati (2013) : [a] cas d'un massif rocheux homogène ; [b] cas d'un massif rocheux fragile recouvrant une formation ductile.

Dans le deuxième cas, le massif rocheux est constitué d'une formation géologique en surface fragile et cassante recouvrant une formation géologique plus facilement déformable en profondeur, dite « ductile » (cf. Figure II.10b). La déformation de la couche géologique ductile sous-jacente est provoquée par le poids du massif rocheux sus-jacent cassant le surplombant. Ce massif rocheux est à l'origine du mouvement d'affaissement et/ou d'effondrement de type DSGSD. Les déplacements se font le long des fractures de traction ou de discontinuités tectoniques subverticales présentes dans le massif sus-jacent (Conti & Tosatti, 1996 ; Carobene & Cevasco, 2011).

Nous retiendrons de la description et de l'analyse des mécanismes qui conditionnent un DSGSD les conclusions développées par Pánek & Klimeš (2016) qui stipulent, après avoir passé en revue les différentes études sur le sujet, que le DSGSD est un mouvement de versant qui se déplace soit latéralement, soit le long d'une surface de cisaillement bien définie en pied de versant, soit en combinant ces deux modes de déformations.

### **II.1.3 DEFIS DE LA COMMUNAUTE SCIENTIFIQUE : DATATION ET SURVEILLANCE**

Nous présentons les approches effectuées par les scientifiques pour étudier une instabilité gravitaire de grande ampleur (cf. partie II.1.3.1), nous expliquons ensuite les méthodes utilisées pour la datation (cf. partie II.1.3.2) et pour la surveillance (cf. partie II.1.3.3). Que ce soit pour la datation ou la surveillance, nous illustrons nos propos avec des exemples.

#### **II.1.3.1 Approches effectuées par les scientifiques et remarques**

Nous venons de voir que beaucoup de questions subsistent dans l'étude des instabilités gravitaires de grandes ampleurs mais la dynamique temporelle reste l'un des aspects les moins étudiés aujourd'hui par la communauté scientifique (Pánek & Klimeš, 2016). Le nombre de cas d'études a effectivement augmenté au cours de ces dernières décennies, mais les connaissances sur le comportement et l'évolution d'un DSGSD au cours du temps, et plus particulièrement à court terme, restent encore faibles et basées sur un nombre limité de cas d'études de DSGSD datés et surveillés (cf. Figure II.5). En France par exemple, il y a à notre connaissance seulement le cas du DSL de La Clapière inclus dans le DSGSD de Colle-Longue dans les Alpes qui est exhaustif.

Une reconstitution fiable de l'histoire d'un DSGSD et même d'un DSL repose pourtant sur une combinaison de deux approches complémentaires : la datation et l'acquisition de données de surveillance récentes et précises (cf. Figure II.11). L'une, la datation, permet

d'estimer la dynamique à long terme d'un DSGSD tandis que l'autre, la surveillance active (avec alerte en temps réel) et/ou passive, permet d'évaluer la dynamique à court terme et moyen terme, à l'instant présent.

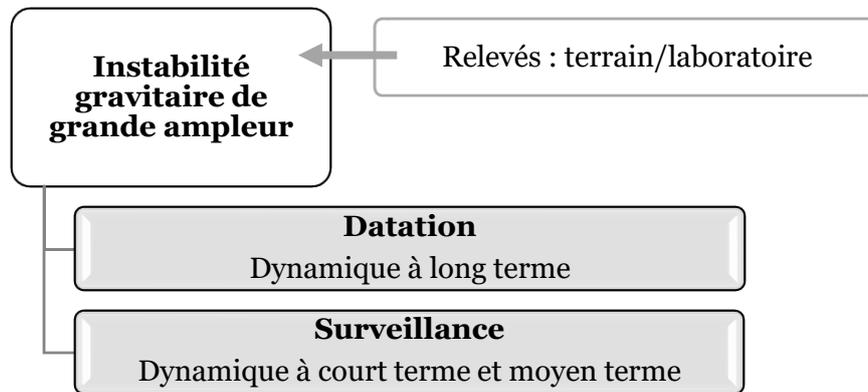


Figure II.11. Approches effectuées par la communauté scientifique pour étudier une instabilité gravitaire de grande ampleur du type DSGSD et du type DSL.

Ces deux approches précédées, aux mieux accompagnées, d'un relevé exhaustif sur le terrain et en laboratoire (analyses lithologiques, structurales, tectoniques, géomécaniques, géophysiques, etc.), sont nécessaires pour évaluer correctement l'influence des facteurs endogènes (les causes internes) et exogènes (les causes externes) contribuant à l'initiation et à l'évolution d'une instabilité gravitaire de grande ampleur au cours du temps (cf. Figure II.11).

Les auteurs suivants, El Bedoui et al. (2009), Le Roux (2009), Le Roux et al. (2011), Hermanns et al. (2013) par exemple, attirent aussi l'attention sur le fait que :

- i) la datation et la surveillance ne sont généralement pas efficacement combinées puisque seule l'une de ces deux approches est généralement utilisée par les scientifiques sur un cas d'étude à l'échelle naturelle ;
- ii) la résolution spatiale choisie pour ausculter un versant montagneux est souvent insuffisante que ce soit pour la datation ou même pour la surveillance.

C'est pourquoi, compte tenu de ces remarques, il paraît nécessaire d'effectuer des études plus poussées sur la cinématique d'une instabilité gravitaire de grande ampleur, couplant à la fois, i) les taux de déplacement historiques déduits de la datation à long terme sur plusieurs siècles, et ii) les taux de déplacement actuels issus d'une surveillance précise à court terme sur au moins 5 ou 10 ans.

Dans la suite de nos travaux de recherche en haute Vallée d'Aspe, et compte tenu des travaux déjà entrepris sur ce site (cf. partie II.2), nous adopterons donc cette stratégie (cf. partie III. Méthodologie). Cette démarche globale et les applications connexes qui en découlent sont indispensables pour mieux comprendre le rôle de la lithologie, de la tectonique ou encore du climat dans l'apparition et l'évolution d'une instabilité gravitaire de grande ampleur. Elles peuvent être susceptibles d'aider à prévoir les éventuels scénarios d'évolution possibles et donc d'éviter au mieux certaines conséquences dramatiques à plus long terme.

### **II.1.3.2 Datation : méthodes et exemples**

L'analyse de l'évolution d'un mouvement de versant montagneux de type DSGSD sur plusieurs siècles, voire même des millénaires, et l'estimation de sa dynamique à long terme, en sont à leurs débuts (Pánek, 2015 ; Pánek & Klimeš, 2016). Pour ce faire, la datation absolue des DSGSD s'appuie sur les méthodes géochronologiques suivantes :

- i) la datation par la luminescence (McCalpin et al., 2011),
- ii) la datation d'exposition des isotopes cosmogéniques (Dunai, 2010).

Pour la datation par la luminescence, les échantillons de roches sont récupérés en réalisant une tranchée dans le versant. Il existe plusieurs techniques. Parmi ces protocoles, les principaux généralement effectués (McCalpin et al., 2011 ; Pánek et al., 2011b ; Gutiérrez et al., 2012a ; cf. Tableau II.3), sont : la thermoluminescence (TL), la luminescence stimulée optiquement (OSL, « Optically Stimulated Luminescence ») et la luminescence stimulée optiquement thermiquement transférée (TT-OSL, « Thermally-Transferred Optically Stimulated Luminescence »).

La mesure des isotopes cosmogéniques terrestres (TCN, « Terrestrial in situ Cosmogenic Nuclides ») tels que le radiocarbone ( $^{14}\text{C}$ ), le chlore 36 ( $^{36}\text{Cl}$ ) et le béryllium 10 ( $^{10}\text{Be}$ ) sur des échantillons de roches bien exposés (au niveau des escarpements principaux généralement) permet de dater un DSGSD et en préciser sa dynamique selon l'échantillonnage sur des gammes temporelles pouvant couvrir les deux derniers millions d'années. Les scientifiques suivants, Gutiérrez-Santolalla et al. (2005), Hippolyte et al. (2006, 2009, 2012), Gutiérrez et al. (2008, 2012b, 2012a), Agliardi et al. (2009b), Le Roux (2009), Le Roux et al. (2009), Sanchez et al. (2010), Pánek et al. (2011b), Carbonel et al. (2013), Hermanns et al. (2013), Zerathe (2013), Zerathe et al. (2013, 2014), El Bedoui et al. (2011), Lebourg et al. (2014), ont obtenu des résultats prometteurs pour estimer l'âge et la dynamique passée d'un DSGSD ou d'un DSL à partir de cette méthode (cf. Tableau II.3).

Tableau II.3. Exemples de 18 instabilités gravitaires de grandes ampleurs du type DSGSD ou du type DSL avec estimation de l'âge et de la dynamique passée à partir d'une ou plusieurs méthodes de datation d'après Pánek & Klimeš (2016) ; modifié. [n.p.] : donnée non précisée.

Nom	Pays	Type	Age (ka)	Dynamique passée (mm/an)	Méthode de datation	Référence(s)
<i>La Marbrière</i>	France (Alpes)	DSL	>400	n.p.	<sup>36</sup> Cl & <sup>10</sup> Be	Zerathe & Lebourg (2012), Zerathe (2013), Zerathe et al. (2014)
<i>Foros</i>	Ukraine	DSGSD	>110	n.p.	<sup>14</sup> C	Pánek et al. (2009b)
<i>Peracalç (Pyrénées)</i>	Espagne (Pyrénées)	DSGSD	>45	>0,1	OSL & <sup>14</sup> C	Gutiérrez et al. (2012a)
<i>Mont Qoshadagh</i>	Iran	DSGSD	>42	n.p.	OSL & <sup>14</sup> C	Baroň et al. (2013)
<i>Mont Rognier</i>	France (Alpes)	DSGSD	~17	0,29-3,15	<sup>10</sup> Be	Hippolyte et al. (2012)
<i>Oppstadhornet</i>	Norvège	DSL	~16,6-14,2	0,6-3,2	<sup>10</sup> Be	Hermanns et al. (2013)
<i>El Ubago</i>	Espagne (Pyrénées)	DSGSD	~16,9	>0,19	<sup>14</sup> C	Gutiérrez et al. (2008)
<i>Zenzano</i>	Espagne	DSGSD	>13,6	0,6	<sup>14</sup> C	Carbonel et al. (2013)
<i>Arcs</i>	France (Alpes)	DSGSD	~11,5	n.p.	<sup>10</sup> Be	Hippolyte et al. (2009)
<i>La Clapière</i>	France (Alpes)	DSL inclus dans un DSGSD	10,3	4-30	<sup>10</sup> Be	Jomard (2006), El Bedoui et al. (2009), Jomard et al. (2014)
<i>Mont Kushtaka</i>	Alaska	DSGSD	>10,2	n.p.	OSL & <sup>14</sup> C	McCalpin et al. (2011)
<i>Mont Watles</i>	Italie	DSGSD	~10	n.p.	<sup>14</sup> C	Agliardi et al. (2009b)
<i>Vallibierna</i>	Espagne (Pyrénées)	DSGSD	~7,8-5,9	n.p.	<sup>14</sup> C	Gutiérrez-Santolalla et al. (2005)
<i>Séchilienne</i>	France (Alpes)	DSL	6,4	3,6-18	<sup>10</sup> Be	Le Roux (2009), Le Roux et al. (2009)
<i>Mont Ondřejník</i>	République tchèque	DSGSD	>5,9	n.p.	OSL	Pánek et al. (2011b)
<i>Le Pra</i>	France (Alpes)	DSL inclus dans un DSGSD	5,7	0,7-13,5	<sup>10</sup> Be	Sanchez et al. (2010)
<i>Teruel</i>	Espagne	DSGSD	3,5	0,6-1	<sup>14</sup> C	Gutiérrez et al. (2012b)
<i>Caire</i>	France (Alpes)	DSL	>3,2	1,6-4	<sup>36</sup> Cl	Zerathe (2013), Zerathe et al. (2014)

Rajoutons que sans pour autant se substituer à la datation, Agliardi et al. (2009b) suggèrent qu'effectuer une étude géomorphométrique détaillée permet déjà en fait de révéler des informations appréciables sur la déstructuration du versant affecté par un DSGSD. Elle permet notamment :

- i) d'évaluer le nombre d'évènements et les volumes mis en jeu liés à la déformation ;
- ii) de proposer une chronologie relative de ces évènements à défaut d'être absolue.

### **II.1.3.3 Surveillance : méthodes et exemples**

Surveiller un DSGSD requiert des exigences aussi pointues que les techniques de datations absolues décrites précédemment : les capteurs de surveillance doivent détecter des mouvements sur des périodes de temps prolongées proches de leur limite de sensibilité (Klimeš et al., 2012). Deux types de mesures, ponctuelles et surfaciques, sont généralement plébiscitées par la communauté scientifique pour ausculter au mieux les déplacements d'un versant affecté par un DSGSD.

Pour les mesures ponctuelles, sont utilisés : les inclinomètres (ou les sondes de forages multiparamètres plus sophistiquées) pour connaître la profondeur de la surface de rupture, les extensomètres équipés de divers capteurs ou des jauges de fissures optiques/mécaniques pour révéler l'ouverture d'une tranchée, les distance-mètres (théodolites et tachéomètres) pour apprécier le changement du modelé topographique. Ils ont été utilisés la plupart du temps avec succès par ces scientifiques : Crosta & Agliardi (2002) ; Berardino et al. (2003) ; Rizzo & Leggeri (2004) ; Brückl & Parotidis (2005) ; Barla et al. (2010) ; Bonci et al. (2010) ; Le Roux (2009) ; Le Roux et al. (2011) ; Hasler et al. (2012) ; Klimeš et al. (2012) ; Crosta et al. (2014) (cf. Tableau II.4).

Tous s'accordent à dire cependant que les conditions d'accès au versant sont parfois compliquées. C'est pourquoi, des scientifiques comme, Brückl et al. (2006), Barla et al. (2010), Bonci et al. (2010), Moro et al. (2007), Booth et al. (2015) s'intéressent à la géodésie spatiale. Positionner des cibles terrestres par satellites s'avère certes moins contraignant, mais pas moins délicat. Cela peut se faire avec :

- i) le système de positionnement GPS (« Global Positioning System »),
- ii) le GPS différentiel (DGPS, « Differential Global Positioning System »),
- iii) le système de positionnement GNSS (« Global Navigation Satellite System »).

Tableau II.4. Exemples de 5 instabilités gravitaires de grandes ampleurs de type DSGSD surveillées d'après Pánek & Klimeš (2016 ; extrait) : estimation de la dynamique à court terme. [n.p.] : donnée non précisée.

<b>Nom</b>	<i>Mont Legnoncino</i>	<i>Greci</i>	<i>Beauregard</i>	<i>Colfiorito</i>	<i>Podall</i>
<b>Pays</b>	Italie	Italie	Italie	Italie	Italie
<b>Profondeur (m)</b>	n.p.	70	>147	200	500-600
<b>Technique de surveillance</b>	PS-SAR	GPS (1) & Inclinomètres (2)	GPS (1) & GB-InSAR (3)	DInSAR	DInSAR
<b>Période de surveillance</b>	1991-2002	1996-2006	2000-2007 (1) ; 2008	Septembre- Octobre 1997	1993-2000
<b>Intervalle de mesures</b>	n.p.	1 an (1)	1 an (1) ; 20 min (3)	n.p.	3 mois
<b>Vitesse annuelle maximum (mm/an)</b>	20	5 (1)	2,4	80 mm pour 1 événement	100 (vertical)
<b>Vitesse annuelle moyenne (mm/an)</b>	2-20	5 (2)	1,4 (1)	n.p.	30-40 (vertical)
<b>Période d'activité maximale</b>	Novembre 2000	n.p.	Été / Printemps	Septembre 1997	Novembre 1999
<b>Facteur(s) aggravant</b>	Pluies extrêmes	n.p.	Neige, pluies	Séisme (MLv=6)	Pluies extrêmes et séismes
<b>Modèle de déformation à court terme</b>	Activité irrégulière	n.p.	Activité régulière	Activité irrégulière	Activité irrégulière
<b>Référence(s)</b>	Ambrosi & Crosta (2006)	Bonci et al. (2010)	Barla et al. (2010)	Moro et al. (2007)	Tolomei et al. (2013)

Les mesures surfaciques permettent d'apporter une meilleure couverture. La lasergrammétrie et la photogrammétrie sont généralement les deux techniques les plus usitées pour surveiller un mouvement de terrain, mais seuls quelques cas d'études à l'instar de ceux de Froese et al. (2009) avec le LiDAR (« Light Detection and Ranging ») et Viero et al. (2010) avec une station totale, y ont eu recours. Notons que ces deux techniques sont communément utilisés pour des mouvements de terrain de moindre envergure.

Les auteurs suivants, Berardino et al. (2003), Colesanti & Wasowski (2006), Delacourt et al. (2007), Moro et al. (2009), Barla et al. (2010), Strozzi et al. (2013), Tamburini et al. (2013), Tolomei et al. (2013), Del Ventisette et al. (2014), Schlögel et al. (2016) ont préféré

développer, à l'instar de la lasergrammétrie et la photogrammétrie, l'interférométrie radar à synthèse d'ouverture (InSAR, « Interferometric Synthetic Aperture Radar ») comme en témoignent les évolutions significatives suivantes (cf. Tableau II.4) :

- i) l'interférométrie SAR avec cibles terrestres réfléchissantes (PS-SAR, « InSAR Persistent Scatterer »)
- ii) l'interférométrie SAR différentielle (DInSAR, « Differential InSAR »),
- iii) l'interférométrie SAR avec des lignes de base courtes (GB-InSAR, « InSAR Small Baseline »), différentielle (GB-DInSAR, « Differential GB-InSAR »).

À partir de ces éléments, nous faisons le constat suivant qui permet de préciser la suite de notre travail : le GNSS différentiel (DGNSS, « Differential Global Navigation Satellite System ») n'est pas encore utilisé pour la surveillance des instabilités gravitaires de grandes ampleurs. Par ailleurs, Barla et al. (2010) remarquent que les résultats des mesures géodésiques manuelles et automatisées de mêmes cibles peuvent fournir des positions tridimensionnelles légèrement différentes. Pour ces raisons, nous développerons cette application afin de clarifier ce point dans la suite de ce travail (cf. partie III.1 & partie IV.1). Nous développerons aussi, comme le suggère Pánek & Klimeš (2016) la surveillance par drone (UAV, « Unmanned Aerial Vehicle ») qui assure une résolution tout aussi fine que l'interférométrie et qui propose à moindre coût une couverture équivalente (cf. partie III.2 & partie IV.2).

## II.2 LE MASSIF DE LA CRISTALLERE

Nous avons choisi comme site d'étude le massif de la Cristallère qui se trouve dans les Pyrénées françaises, où une instabilité gravitaire de grande ampleur de type DSL a été identifiée récemment (Lebourg et al., 2014). Nous commençons cette partie par un aperçu général où nous expliquons notamment les particularités de ce site comme l'existence d'un « *cryptoanthropisme* » (cf. partie II.2.1). Nous détaillons ensuite plus amplement le contexte et le cadre géologique (cf. partie II.2.2). Enfin, nous présentons les instabilités gravitaires principales qui affectent le site et les travaux déjà entrepris pour les caractériser et comprendre leurs cinématiques (cf. partie II.2.3).

### II.2.1 APERÇU GENERAL

Dans cet aperçu général, nous situons plus précisément le massif de la Cristallère (cf. partie II.2.1.1) et ses limites (cf. partie II.2.1.2). Nous décrivons ensuite l'orohydrographie (cf. partie II.2.1.3), l'occupation des sols (cf. partie II.2.1.4), le climat (cf. partie II.2.1.5) et la sismicité (cf. partie II.2.1.6) de ce lieu.

#### II.2.1.1 Situation géographique

Le massif de la Cristallère se situe au sud-ouest de la France (cf. Figure II.12a), dans les Pyrénées, chaînes de montagnes du sud-ouest de l'Europe constituant une frontière naturelle séparant la France au nord de l'Espagne au sud. Il est en fait limitrophe à la frontière administrative franco-espagnole. Il s'étend en territoire français dans le secteur de la haute Vallée d'Aspe, sur une fraction du département des Pyrénées-Atlantiques (64), un département de la région Nouvelle-Aquitaine. Il se trouve, plus précisément, sur la commune de Borce en rive gauche du gave d'Aspe (cf. Figure II.12b), immédiatement à l'ouest et l'amont du village d'Urdo.

#### II.2.1.2 Les limites

Le massif de la Cristallère qui compte une superficie de l'ordre de 1700 hectares soit 17 kilomètres carrés, est limité, à l'est, par le gave d'Aspe et la route nationale 134 et à l'ouest par le gave du Baralet (cf. Figure II.12b). Il est limité au nord par la zone de confluence de ces deux cours d'eau, au niveau de l'usine hydroélectrique du Baralet (cf. Figure II.12b), tout près du Fort du Portalet. Son emprise s'achève, plus en amont, au sud au niveau du lieu-dit les Forges d'Abel (cf. Figure II.12b), quelques centaines de mètres au nord du tunnel du Somport. Précisons que le tunnel du Somport est un ouvrage frontalier qui établit la connexion depuis le nord, entre les hautes vallées d'Aspe et d'Aragon. Ces deux vallées communiquent via deux

autres passages : le col du Somport un peu plus en amont à l'est, et l'ancienne liaison ferroviaire Pau-Canfranc qui d'ailleurs traverse ou longe à l'est l'ensemble du massif de la Cristallère (cf. Figure II.12b).

### **II.2.1.3 Orohydrographie**

L'hydrographie et l'orographie s'organisent autour d'un axe d'orientation globalement nord-sud qui correspond à celui des deux principales vallées qui limitent le massif de la Cristallère, la vallée du gave d'Aspe et la vallée du gave du Baralet. L'orientation des vallées et des gaves (cours d'eau principaux) suit en fait les failles profondes du substratum Paléozoïque (Ternet et al., 2004).

Le gave d'Aspe rejoint le gave d'Ossau (cours d'eau principal de la vallée d'Ossau, célèbre pour son pic du Midi et son attrait touristique), en piémont pyrénéen, soit à Oloron-Sainte-Marie pour former le gave d'Oloron. Mais plus localement, comme nous l'avons précisé précédemment, le gave du Baralet à l'ouest conflue avec le gave d'Aspe entre Urdos et le Fort du Portalet : les deux vallées sont ainsi séparées par un massif rocheux, celui du massif de la Cristallère (cf. Figure II.12b). Le ruisseau Lapachouaou, qui prend sa source près du col de même nom dans le secteur sud du massif de la Cristallère, entaille profondément le massif montagneux étudié à cet endroit, avant de rejoindre le gave d'Aspe (cf. Figure II.12b).

La crête du massif montagneux est jalonnée suivant une direction sud-nord par les sommets et cols suivants (Figure II.12b) : le col de Lapachouaou (1891 mètres), le pic du Souperet (2033 mètres), le pic du Baralet (2052 mètres), le col de la Coumette (1789 mètres) et le pic de la Cristallère (1874 mètres). Le village d'Urdos, point bas du site d'étude, situé à une altitude moyenne de 784 mètres, permet d'apprécier le relief typique des Pyrénées françaises que nous retrouvons ici, à savoir des pentes raides, des falaises escarpées, ponctuées parfois par des sentiers pédestres accessibles.

### **II.2.1.4 Occupation des sols : un site « cryptoanthropisé »**

Concernant l'occupation des sols, outre les quelques fermes parsemées ici et là dans les quartiers du Bérat du haut et du Bérat du bas (cf. Figure II.12b), dont l'activité est essentiellement tournée vers l'élevage et la production de fromage, et les quelques demeures secondaires qui environnent les contrebas du versant est du massif de la Cristallère, les sols paraissent peu anthropisés. Les forêts de landes ligneuses sur le versant ouest et de feuillus sur le versant est tapissent presque totalement l'ensemble du massif de la Cristallère.

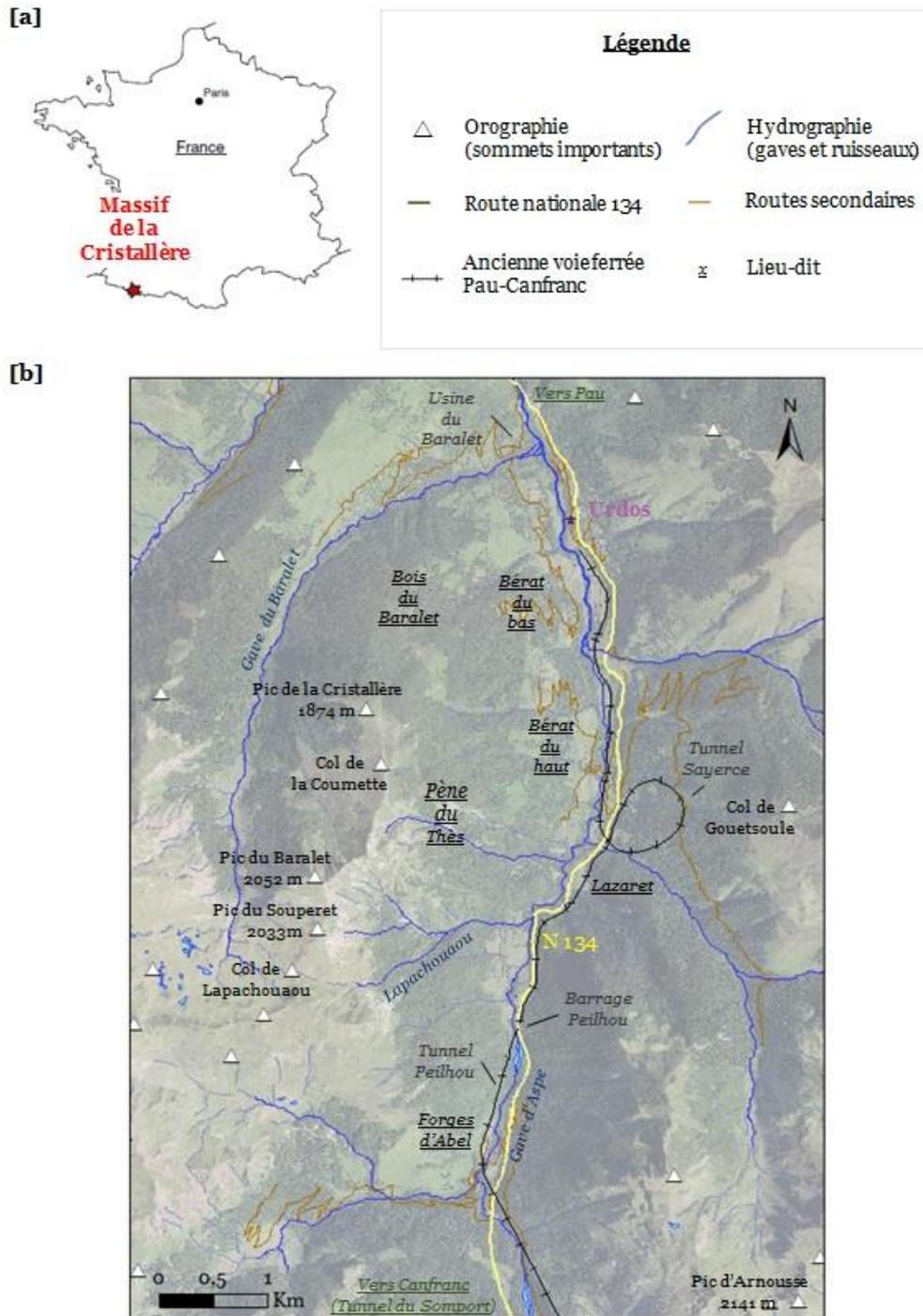


Figure II.12. Situation du massif de la Cristallère en France [a] et en haute Vallée d'Aspe près de la frontière franco-espagnole (ortho-image 2012 de l'IGN récupérée sur <http://professionnels.ign.fr/> en mars 2016) [b].

### **a) L'ancienne voie ferrée Pau-Canfranc**

Nous constatons sur la limite est du massif de la Cristallère, les témoins de l'ancienne voie ferrée transfrontalière Pau-Canfranc qui permettait d'acheminer autrefois voyageurs et marchandises : les bâtiments désaffectés des gares d'Urdos et des Forges d'Abel, et même des ouvrages remarquables comme le tunnel hélicoïdal de Sayerce (cf. Figure II.12b). Cette ligne a été inaugurée en 1928, mais fermée en 1970 suite à l'accident du pont de l'Estanguet, en partie basse de la Vallée d'Aspe. Depuis 2014, elle a été réhabilitée entre Oloron-Sainte-Marie et Bedous, à quelques kilomètres au nord du massif de la Cristallère. La mise en service a eu lieu au printemps 2016.

Nonobstant, la voie ferrée est toujours interrompue entre Bedous et Canfranc : l'une des difficultés majeures, en sus de l'aspect économique, est la remise en état d'ouvrages affectés par des mouvements de terrain comme le tunnel du Peillhou près des Forges d'Abel dans la zone sud du massif de la Cristallère (cf. Figure II.12b). D'une longueur de 335 mètres, sa traversée est aujourd'hui interdite et dangereuse : des grilles de défense bardées de panneaux d'affichage RFF/SNCF verrouillent les deux extrémités du tunnel. Nous verrons dans le détail pourquoi dans la suite de ce travail (cf. partie IV. Résultats et discussion).

### **b) L'exploitation hydraulique**

Nous observons également la présence d'aménagements pour l'exploitation hydraulique : la centrale du Baralet, chambre d'équilibre des eaux des gaves d'Aspe et du Baralet, située dans la zone nord du massif de la Cristallère et le barrage du Peillhou d'une hauteur de 18 mètres pour une réserve d'eau approximative de 135000 m<sup>3</sup> dans la zone sud (cf. Figure II.12b). La connexion entre ces deux annexes hydrauliques se fait via une galerie souterraine visitable (profil circulaire de 1,80 mètre de diamètre) d'amenée en charge des eaux du gave d'Aspe. Cette galerie souterraine a été mise en service en 1927. Son tracé (d'une longueur de 5000 mètres pour une pente uniforme de 1/1000) a été par principe de précaution délibérément censuré ici puisque c'est un ouvrage sensible d'EDF.

Revenons néanmoins sur une partie de celle-ci puisque des désordres d'origine géomorphologique ont été occasionnés sur la galerie par le passé (cf. Tableau II.5 & Figure II.13). Il n'y a eu aucun incident entre 1927 et 1930. À partir de 1930 diverses fissures sont constatées chaque année sur l'ouvrage jusqu'en 1937 où la galerie est cisailée près de la fenêtre « Lapédagne » (cf. Tableau II.5) c'est-à-dire dans le secteur de Bérat du haut (cf. Figure II.12b). L'exécution d'un manchon métallique aura nécessité 3 semaines d'arrêt de la centrale (EDF, 1949 & 1950). De 1937 à 1944, les désordres continuent et s'aggravent : entre 1944 et 1945, la galerie finit par s'affaisser à cet endroit progressivement malgré les solutions mises en œuvre

pour l'éviter. Une déviation de la galerie a été envisagée et réalisée entre 1946 et 1950 ; notons qu'elle a entraîné l'arrêt complet de la centrale du 16 mai au 9 août 1949 (EDF, 1949 & 1950).

Tableau II.5. Rapport des incidents et des solutions mises en œuvres par EDF entre 1930 et 1945 au niveau de la galerie drainante de la centrale hydroélectrique du Baralet dans le secteur Lapédagne (d'après EDF, 1950).

<i>Année</i>	<i>Nature des incidents</i>	<i>Solutions mises en oeuvre</i>
1930	Fissures diverses chaque année	Rejointage des fissures chaque année
1931		
1932		
1933		
1934		
1935		
1936		
<b>1937</b>	Cisaillement de la galerie à 180 m de la fenêtre « Lapédagne »	Exécution d'un manchon métallique
1938	Fissures diverses chaque année	Rejointage des fissures et travaux de maçonnerie aux fenêtres
1939		Rejointage des fissures chaque année
1940		
1941		
1942		
1943		
<b>1944</b>	Affaissement de la galerie	Rejointage des fissures chaque année
<b>1945</b>	Fissures du manchon et affaissement de la galerie	

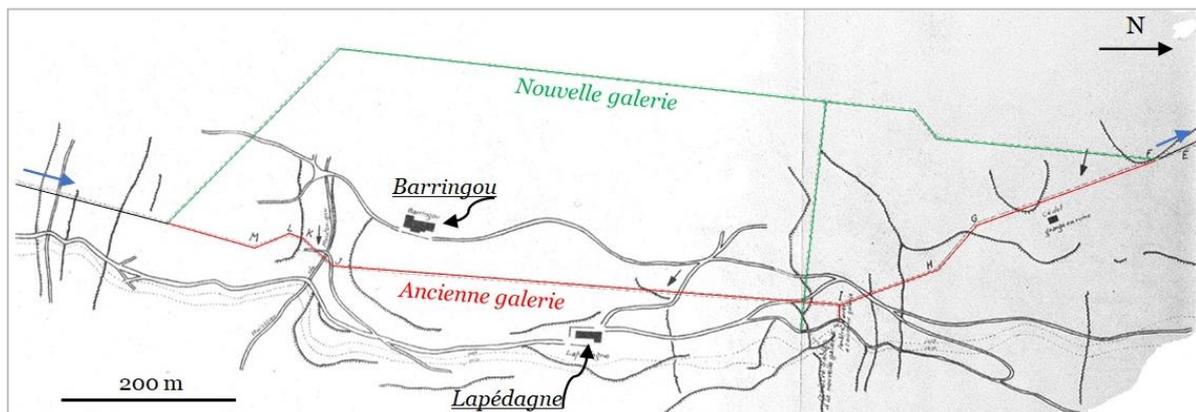


Figure II.13. Tracé schématique et partiel de l'ancienne galerie et de la nouvelle galerie de la centrale hydroélectrique du Baralet dans le secteur des fermes Lapédagne et Barringou en amont de Bérat du haut (EDF, 1949 ; annoté).

Précisons que celle-ci se prolonge par une conduite forcée aérienne au niveau de l'usine du Baralet, bien visible depuis le village d'Urδος. Cette particularité témoigne en fait du potentiel industriel de la Vallée d'Aspe exploité depuis 1927 (Plandé, 1929) et de ce fait de l'existence d'un « *cryptoanthropisme* » très souvent ignoré dans le cadre d'une étude exhaustive des risques naturels.

#### **II.2.1.5 Climat**

Les vallées des gaves d'Aspe et du Baralet sont deux anciennes vallées glaciaires. L'étude de détail et la cartographie des dépôts de moraines réalisées par Lebourg (2000), Lebourg et al. (2003), Fabre et al. (2003) et Lebourg et al. (2004) ont permis à ces auteurs de reconstituer les glaciers du Würm (-18000 ans), dernière période glaciaire, et montrer ainsi l'existence de deux glaciers importants de part et d'autre du massif de la Cristallère : le glacier principal du gave d'Aspe et le glacier secondaire du Baralet. Ces glaciers ont induit le creusement d'une auge glaciaire de plus de 100 mètres de profondeur en pied de versant lors de leurs périodes paroxysmales, puis une forte décompression du massif montagneux lors de leurs retraits. L'érosion glaciaire a donc été ici prépondérante.

Aujourd'hui, les glaciers ne sont plus. Le climat est de type océanique. Ainsi, le régime du gave d'Aspe et de ses affluents présentent deux périodes de hautes eaux : la première, au printemps (avril, mai et juin) qui correspond à la fonte des neiges et aux pluies printanières, et la seconde, moins importante, provoquée au début de l'hiver par les pluies automnales et la fonte précoce du nouveau manteau neigeux (novembre et décembre). À la fin de l'été (août et septembre), généralement une longue période d'étiage s'installe.

##### **a) Cumuls de précipitations entre 1948 et 2010**

Nous avons analysé les cumuls annuels de précipitations entre 1948 et 2010 (cf. Figure II.14) à partir des cumuls mensuels de précipitations relevés par EDF à deux endroits stratégiques du massif de la Cristallère : au niveau du barrage du Peilhou (à 1068 mètres d'altitude dans la zone sud, entre janvier 1948 et décembre 1974 et entre janvier 1990 et décembre 2010), et au niveau de l'usine hydroélectrique du Baralet (à 760 mètres d'altitude dans la zone nord, entre janvier 1975 et décembre 2010).

La pluviométrie du massif de la Cristallère est conséquente. En effet, les valeurs moyennes annuelles de précipitations obtenues selon les périodes sont révélatrices. Au barrage du Peilhou, la pluviométrie annuelle moyenne est de 1938 mm pour la période 1948-1974 (26 ans) et de 1830 mm pour la période 1990-2010 (20 ans) (cf. Figure II.14). À l'usine hydroélectrique du Baralet, 308 mètres d'altitude en moins et quelques kilomètres plus au

nord, la pluviométrie annuelle moyenne est de 1442 mm pour la période 1975-2010 (35 ans) (cf. Figure II.14). En fait, pour une même période considérée, par exemple entre 1990 et 2010, nous constatons en moyenne 430 mm de précipitation par an en plus au niveau du barrage du Peilhou (1830 mm à 1068 mètres et 1400 mm à 760 mètres).

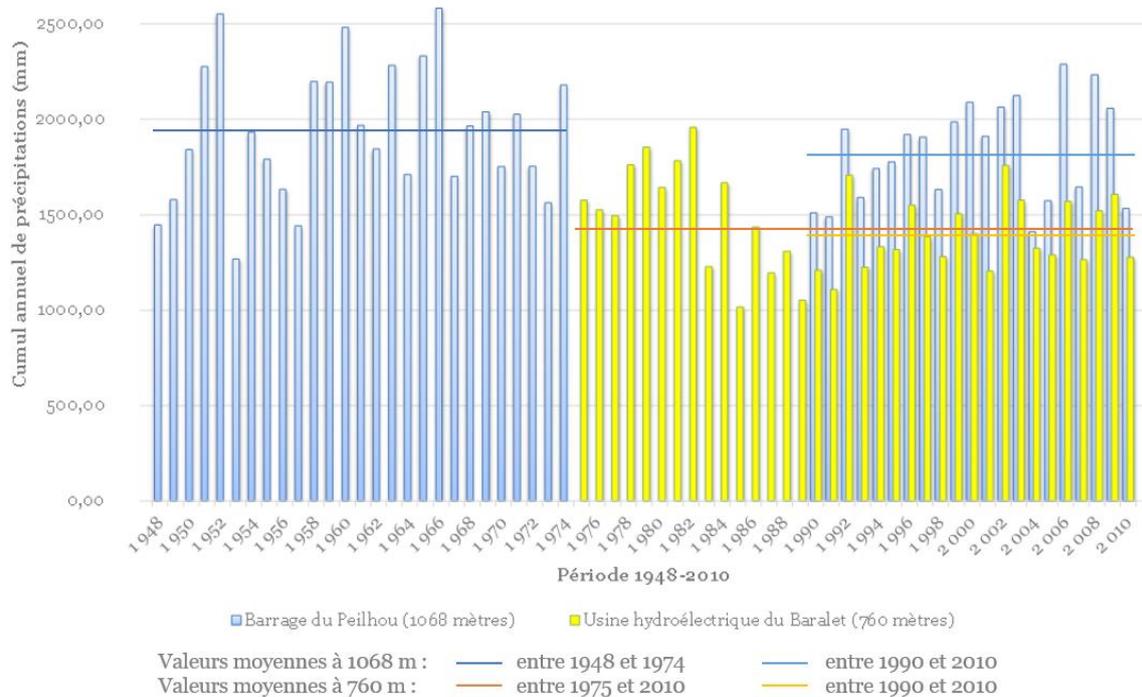


Figure II.14. Cumuls annuels de précipitations pour la période 1948-2010 relevés au niveau des sites suivants : le barrage du Peilhou (zone sud du massif de la Cristallère) et l'usine hydroélectrique du Baralet (zone nord du massif de la Cristallère). Les valeurs moyennes annuelles de précipitations à 1068 mètres d'altitude (barrage du Peilhou) pour les périodes 1948-1974 et 1990-2010 et à 760 mètres d'altitude (usine hydroélectrique du Baralet) pour la période 1975-2010 et 1990-2010 sont également indiquées. Cette illustration a été réalisée à partir des données mensuelles fournies en 2015 par EDF (rapport interne).

Aussi, précisons les minimas et maximas relevés sur la période 1948-2010 (cf. Figure II.14). Pour l'usine hydroélectrique du Baralet, le cumul annuel minimum de précipitation est de 1017 mm et a été relevé en 1985 ; le cumul annuel maximum est de 1957 mm, et a été relevé trois ans plus tôt en 1982 (cf. Figure II.14). Pour le barrage du Peilhou, le cumul annuel minimum de précipitations est de 1267 mm et a été relevé en 1953 ; le cumul annuel maximum est de 2581 mm, et a été relevé treize ans après en 1966 (cf. Figure II.14).

Notons également que les cumuls mensuels maximums étaient de 434 mm en octobre 1992 pour l'usine hydroélectrique du Baralet et de 514 mm en octobre 1960 pour le barrage du Peilhou.

## b) Cumuls de précipitations depuis 2010

Nous avons analysé également les cumuls mensuels de précipitations entre janvier 2010 et juin 2016 (cf. Figure II.15). Ils ont été relevés automatiquement avec une acquisition en temps réel par MétéoFrance au niveau de la station codée 64542006 Urdos RN134. Cette station qui a été mise en service le 1<sup>er</sup> février 2005 se situe au niveau des Forges d'Abel (zone sud du massif de la Cristallère) à 1074 m d'altitude. Précisons qu'elle est proche géographiquement du barrage du Peilhou et donc de la station EDF du barrage du Peilhou. Les données sont disponibles via ce lien : <https://donneespubliques.meteofrance.fr/> (dernière consultation en septembre 2017).

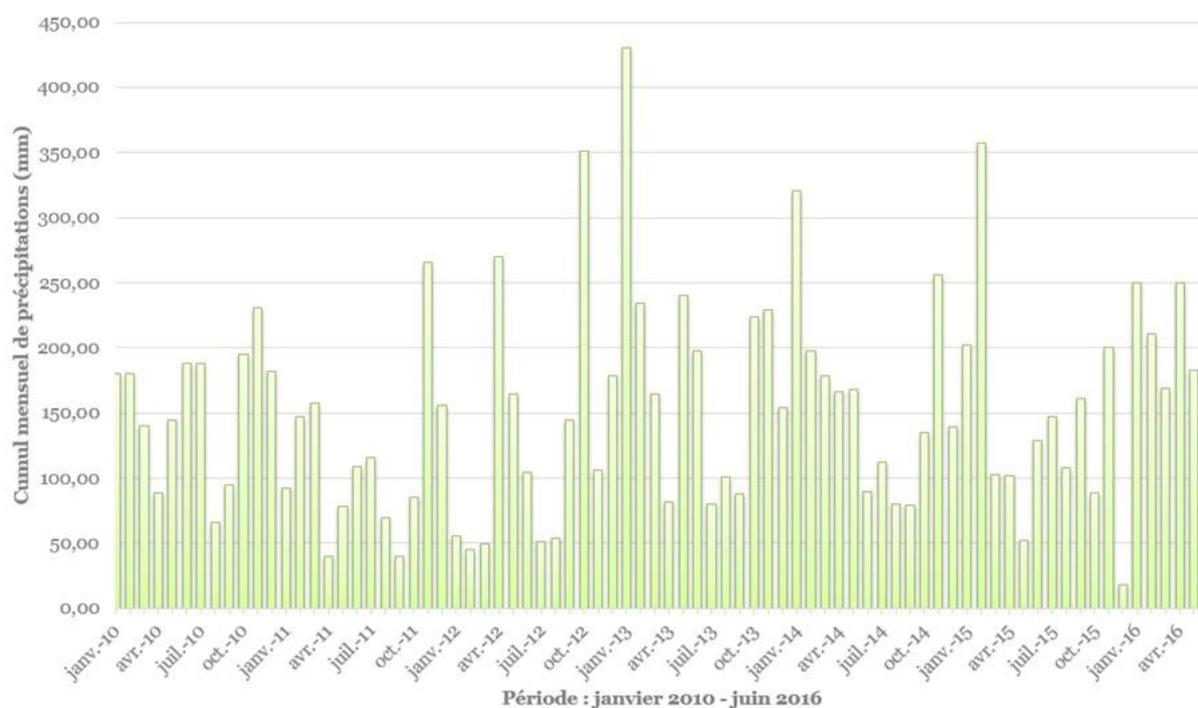


Figure II.15. Cumuls mensuels de précipitations entre janvier 2010 et juin 2016 relevés automatiquement par la station MétéoFrance 64542006 Urdos RN134 au niveau des Forges d'Abel à 1074 m d'altitude (zone sud du massif de la Cristallère). Cette illustration a été réalisée à partir des données mensuelles de MétéoFrance récupérées en septembre 2017 via ce lien <https://donneespubliques.meteofrance.fr/>.

Les cumuls de précipitations mensuels relevés avec MétéoFrance entre le 1<sup>er</sup> janvier 2010 et le 30 juin 2016 sont illustrés ci-avant (cf. Figure II.15). Précisons simplement pour l’instant les minimas et maxims relevés sur la période. Le cumul mensuel minimum de précipitations est de 18,10 mm et a été relevé en décembre 2015 ; le cumul mensuel maximum est de 430,30 mm et a été relevé en janvier 2013 (cf. Figure II.15).

La pluviométrie annuelle moyenne est de 1878,80 mm en 2010, 1355,40 mm en 2011, 1576,60 mm en 2012, 2224,40 mm en 2013, 1922,90 mm en 2014 et 1668,30 mm en 2015. Nous remarquons cependant une différence considérable pour l’année 2010 entre la station d’EDF au niveau du barrage du Peilhou et celle de MétéoFrance située pourtant juste à côté, soit près de 346 mm de précipitation en plus sur l’année avec MétéoFrance (cf. Figure II.16).

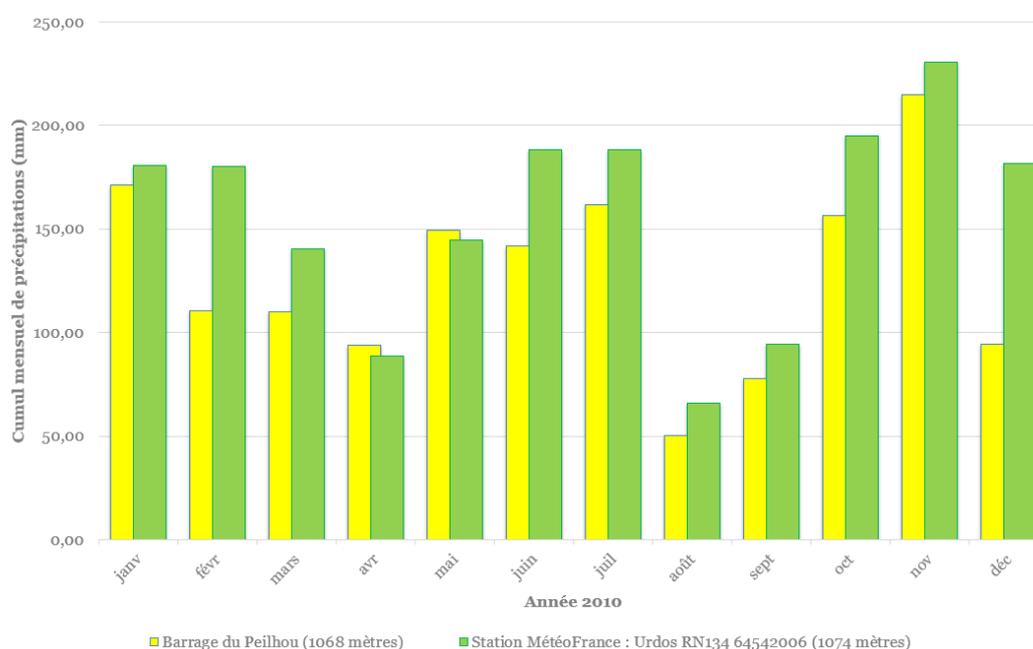


Figure II.16. Cumuls mensuels de précipitations pour l’année 2010 relevés [a] par EDF au niveau du barrage du Peilhou à 1068 m d’altitude et [b] automatiquement par la station MétéoFrance 64542006 Urdos RN134 au niveau des Forges d’Abel à 1074 m d’altitude. Les stations sont proches géographiquement. Cette illustration a été réalisée à partir des données mensuelles de 2010 fournies en 2015 par EDF (rapport interne) et celles de MétéoFrance récupérées via ce lien <https://donneespubliques.meteofrance.fr/> en septembre 2017.

Les différences sont significatives au mois de février avec 69,92 mm en plus, au mois de mars avec 30,29 mm en plus, au mois de juin avec 46,36 mm en plus, au mois d’octobre

avec 38,26 mm en plus et au mois de décembre avec 87,43 mm en plus pour MétéoFrance (cf. Figure II.16). Nous expliquons cette différence en raison des deux remarques qui suivent : i) les relevés sont réalisés manuellement par EDF tandis que les relevés sont réalisés par MétéoFrance automatiquement et ii) la neige semble mieux prise en compte par MétéoFrance puisque les capteurs sont conçus de la sorte. Nous privilégierons donc les données de MétéoFrance sans pour autant remettre en cause les constats faits précédemment entre la zone sud et la zone nord du massif de la Crystallère puisque les relevés d'EDF ont été réalisés tous deux manuellement.

### II.2.1.6 Sismicité

La chaîne des Pyrénées est une région sismiquement active (Souriau et al., 2014). Les séismes y sont nombreux, particulièrement dans la partie occidentale et centrale de la chaîne, où se trouve le massif de la Crystallère (cf. Figure II.17).

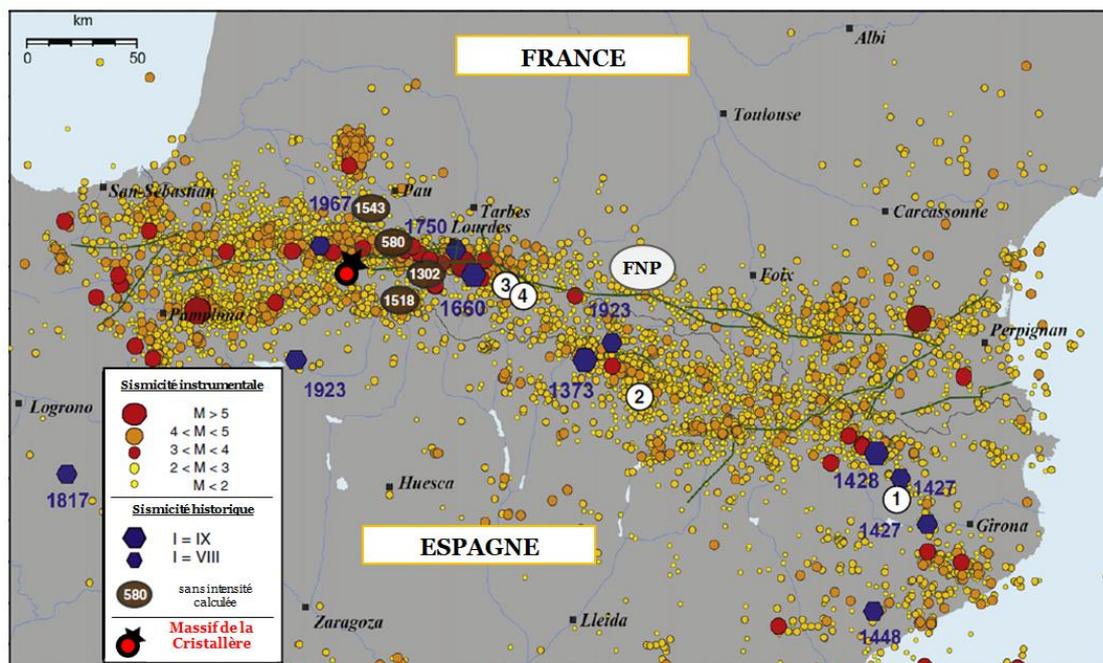


Figure II.17. La sismicité instrumentale et les plus grands événements historiques (avec une intensité macrosismique MSK 1964 à l'épicentre maximale VIII et IX, ou répertoriés comme importants, mais sans intensité calculée) au niveau de la chaîne des Pyrénées (d'après Honoré et al., 2011 in Lebourg et al., 2014 ; modifié). FNP : faille nord-pyrénéenne. DSGSD et DSL cosismiques : (1) Zarroca et al. (2012) ; (2) Gutiérrez et al. (2012a) ; (3) Gutiérrez-Santolalla et al. (2005) ; (4) Gutiérrez et al. (2008).

## a) Sismicité historique

Nous rappelons que pour une intensité macrosismique à l'épicentre de :

- i) V, les constructions tremblent dans leurs ensembles ;
- ii) VI, les dégâts observés en surface sont légers, mais des glissements de terrain peuvent se produire en montagne ;
- iii) VII, les dégâts observés en surface sont modérés et généralement des fissures apparaissent sur les constructions ;
- iv) VIII, les constructions les plus vulnérables sont généralement détruites et presque toutes subissent des dégâts importants ;
- v) IX, de nombreuses constructions sont détruites.

Des secousses sismiques importantes d'une intensité macrosismique MSK 1964 (Medvedev-Sponheuer-Karnik) à l'épicentre de VIII ou IX, ont été signalées dans le passé, à moins de 100 kilomètres du massif de la Cristallère (cf. Figure II.17), comme celles du séisme d'Arudy le 29 février 1980, du séisme d'Arette le 13 août 1967, du séisme de Navarre le 10 juillet 1923, des séismes de Bigorre le 24 mai 1750 et le 21 juin 1660 et du séisme de Ribagorza le 3 mars 1373. Cependant, seuls les séismes d'Arudy (1980) et d'Arette (1967) ont été a priori ressentis sur le massif de la Cristallère avec une intensité de V/XII (BRGM, 2017). Les archives disponibles aujourd'hui sur SisFrance (BRGM, 2017) via ce lien <http://www.sisfrance.net/> que nous avons consulté en mai 2017 ne permettent ni d'affirmer ni de réfuter un ressenti quelconque des autres séismes cités précédemment au niveau du massif de la Cristallère. Un autre séisme historique d'intensité épiscopale macrosismique de VII a été également ressenti avec une intensité de V sur le massif de la Cristallère (BRGM, 2017) : le séisme de Bigorre le 13 juillet 1904.

D'autres événements historiques comme le séisme du Lavédan en l'an 580, les séismes de Bigorre le 19 février 1302 et le 17 mars 1518, le séisme de Mauléon-Licharre le 14 septembre 1543 ont été signalés comme importants bien que nous ne disposons pas de données dans les archives quant à leurs intensités épiscopales (cf. Figure II.17). Pour le séisme du Lavédan en l'an 580, nous disposons du témoignage de Grégoire de Tours (cf. Figure II.18), qui permet de constater que ce séisme a provoqué des dégâts importants dans les Pyrénées et peut être même au niveau du massif de la Cristallère. C'est d'ailleurs l'hypothèse discutée dans les travaux de Lebourg et al. (2014). Nous y revenons juste après (cf. partie II.2.3).

#### 580. Séisme à Bordeaux, dans les Pyrénées et en Espagne

*Historia Francorum* de Grégoire de Tours (Tours)

"La 5e année du règne de Childebert [580]... La ville de Bordeaux fut gravement secouée par un tremblement de terre, et les remparts de la cité présentèrent des risques de renversement; toute la population fut saisie d'une crainte de la mort telle qu'elle s'imaginait que si elle ne fuyait pas, elle serait engloutie avec la ville. Cette secousse s'étendit dans les cités voisines et atteignit même l'Espagne, mais pas avec la même violence. Toutefois des sommets des Pyrénées roulèrent d'immenses pierres, qui renversèrent les troupeaux et les hommes".

Figure II.18. Témoignage du séisme du Lavédan en 580 par Grégoire de Tours, évêque et historien de l'Église et des Francs (Alexandre, 1990).

### b) Sismicité actuelle

D'après le zonage sismique en vigueur depuis le 1<sup>er</sup> mai 2011 qui divise le territoire français en cinq zones de sismicité croissante, le massif de la Cristallère se trouve en zone 4 (<http://www.planseisme.fr/Zonage-sismique-de-la-France.html>, dernière consultation en septembre 2017).

Pour la période d'étude concernée par ce travail, nous avons recherché sur le catalogue du Réseau National de Surveillance Sismique (RéNaSS) via ce lien <http://renass.unistra.fr/recherche> en mai 2017, les événements survenus entre 2013 et 2016 afin d'avoir une idée de la récurrence des séismes et de leurs magnitudes (MLv).

Notons que la magnitude d'un séisme correspond à la mesure de l'énergie libérée par le tremblement de terre. En fait, plus le séisme libère de l'énergie, plus la magnitude est élevée. L'échelle de Richter, qui est une échelle ouverte (pas de limite supérieure), est un outil de mesure qui permet de la définir. À partir d'une magnitude de 5, le séisme est capable d'engendrer sur une large distance des dégâts importants en particulier sur des constructions vulnérables comme des bâtiments anciens ou même modernes, mais présentant des défauts de construction.

Entre le 1<sup>er</sup> janvier 2013 et le 31 décembre 2016, 1119 séismes ont eu lieu dans un rayon de 100 kilomètres autour du massif de la Cristallère, 636 séismes dans un rayon de 50 kilomètres et 215 séismes dans un rayon de 25 kilomètres, toutes magnitudes confondues. Nous relevons deux séismes qui ont eu une magnitude supérieure ou égale à 4 : le séisme de Lacq du 2 septembre 2013 (4 MLv) à environ 60 kilomètres du massif de la Cristallère et le séisme de Lourdes du 29 avril 2014 (4,5 MLv) à environ 50 kilomètres.

Nous présentons ici uniquement les séismes ayant eu lieu dans un cercle d'un rayon de 50 kilomètres autour du massif de la Cristallère pour la suite de cette analyse. Il y a eu, pour la période 2013-2016, 6 séismes d'une magnitude comprise entre 3 et 4, 91 séismes d'une magnitude comprise entre 2 et 3, 419 séismes d'une magnitude comprise entre 1 et 2 et 120 séismes qui avaient une magnitude inférieure à 1 (cf. Figure II.19). En d'autres termes, plus de 99 % des séismes pendant cette période et à cet endroit ont une magnitude inférieure à 3.

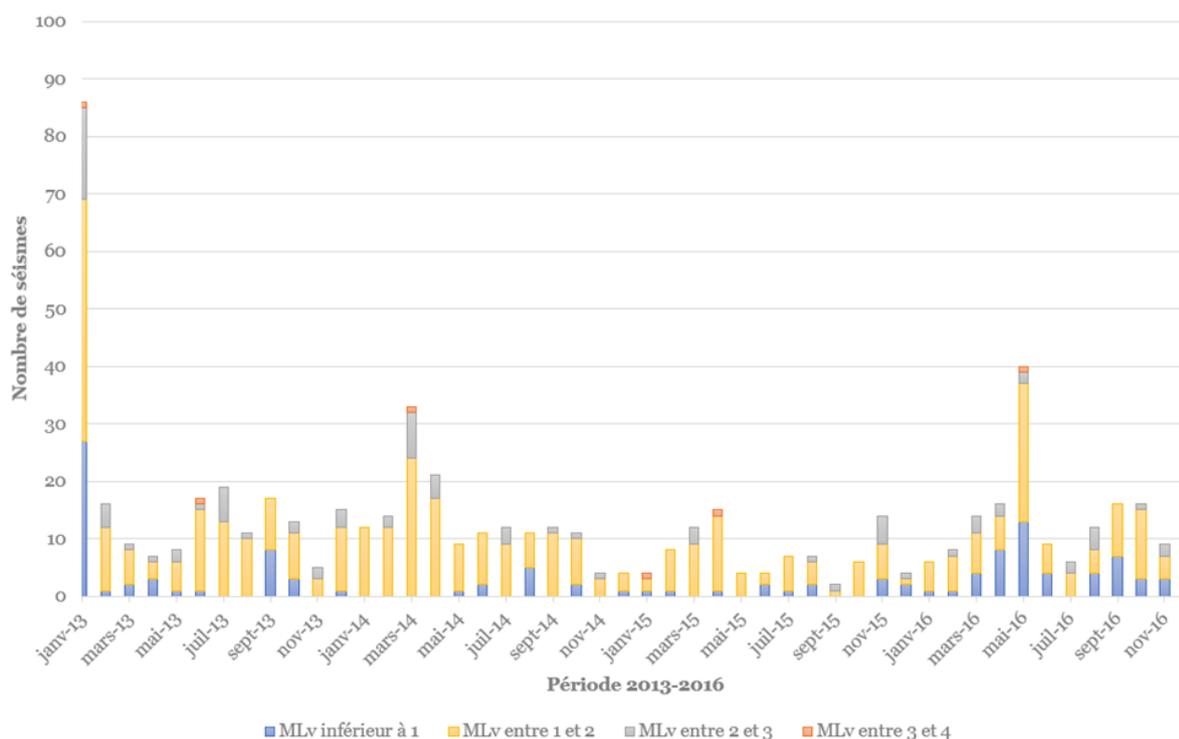


Figure II.19. Séismes survenus dans un rayon de 50 kilomètres autour du massif de la Cristallère pour la période 2013-2016 en fonction de leurs magnitudes (MLv). Cette illustration a été réalisée à partir des données du Réseau National de Surveillance Sismique (RéNaSS, <http://renass.unistra.fr/recherche>, dernière consultation en mai 2017).

Nous remarquons également que l'activité sismique est plus ou moins soutenue suivant la période (cf. Figure II.19). C'est surtout le cas en janvier 2013 (86 séismes) et dans une moindre mesure en mars 2014 (33 séismes) et en mai 2016 (40 séismes). Précisons ici les données que nous avons pour mai 2016 : il y a eu un séisme d'une magnitude de 3,9 le 11 mai comme nous avons pu le dire précédemment, et 2 séismes d'une magnitude de 2,3 et 2,5 le 17 mai (cf. Figure II.19). Ces trois séismes avaient un épicentre localisé dans le secteur d'Arette à

quelques kilomètres au nord du massif de la Cristallère. Il y a eu aussi 24 séismes d'une magnitude comprise entre 1 et 2 et 13 séismes qui avaient une magnitude inférieure à 1 (cf. Figure II.19). Si nous excluons le mois de janvier 2013, le mois de mai 2016 est celui qui enregistre le plus de séismes. Cette dernière information à toute son importance. Nous verrons pourquoi dans la suite de ce travail (cf. partie IV. Résultats et discussion).

## II.2.2 GEOLOGIE

Nous présentons le cadre et le contexte géologique (cf. partie II.2.2.1), nous décrivons les formations géologiques présentes (cf. partie II.2.2.2) et les structures tectoniques du Paléozoïque existantes (cf. partie II.2.2.3).

### II.2.2.1 Cadre et contexte géologique

Le massif de la Cristallère se trouve, d'un point de vue géologique, dans la partie occidentale de la « zone axiale des Pyrénées » (ZAP) (cf. Figure II.20) qui est essentiellement représentée par des terrains du Paléozoïque affectés par des plis hectométriques et des failles ou accidents chevauchants hérités des cycles orogéniques Hercynien et Alpin (Barnolas & Chiron, 1996).

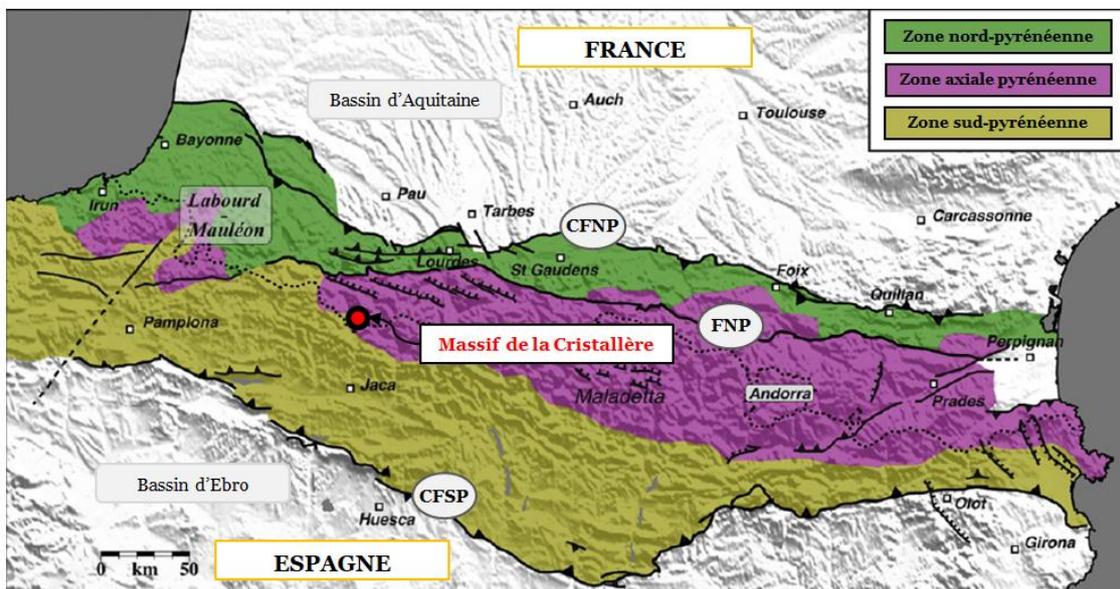


Figure II.20. Les principales unités structurales de la chaîne des Pyrénées avec FNP, la faille nord-pyrénéenne, CFNP le chevauchement frontal nord-pyrénéen et CFSP le chevauchement frontal sud-pyrénéen (d'après Choukroune, 1992 in Souriau et al., 2014 ; modifié).

Nous insistons dans la suite de ce travail sur les grands traits structuraux (les plis, les failles et les plans de chevauchement) puisqu'ils environnent et conditionnent surtout l'apparition des instabilités gravitaires de grandes ampleurs tardives holocènes à historiques comme le DSL de la Cristallère (Lebourg et al., 2014).

### II.2.2.2 Formations géologiques

En haute vallée d'Aspe, les formations géologiques rencontrées qui correspondent au socle Paléozoïque de la « zone axiale des Pyrénées » (ZAP), sont celles du Dévonien inférieur pour les plus anciennes et celles du Permo-Trias pour les plus récentes (cf. Figure II.21).

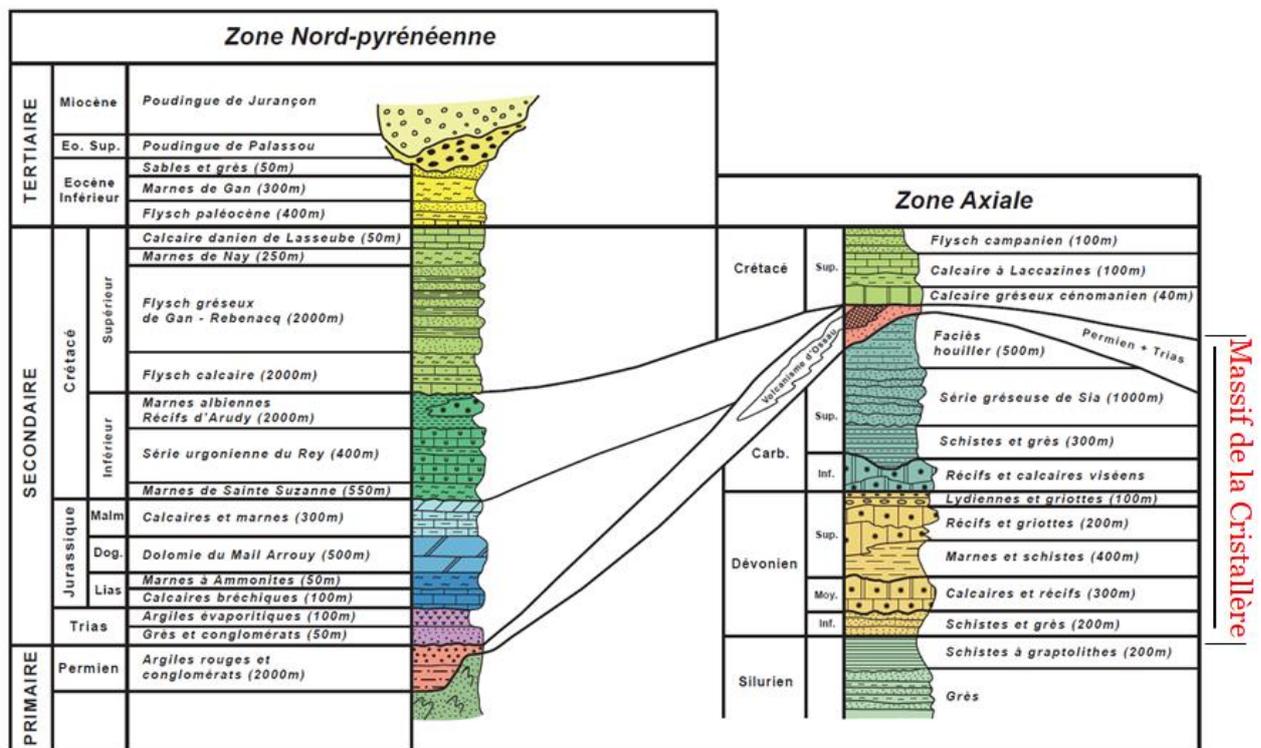


Figure II.21. Stratigraphie synthétique des principales formations géologiques rencontrées dans les zones nord et axiale des Pyrénées d'après Delfaud et al. (1980) in Geoval ([http://www.geoval.fr/images/Geoval/documentation/pyr\\_strat\\_chart.pdf](http://www.geoval.fr/images/Geoval/documentation/pyr_strat_chart.pdf), mai 2017). Pour le massif de la Cristallère, les formations sont essentiellement celles du Dévonien calcaire, du Carbonifère schisto-gréseux (« Culm ») et du Permo-Trias rouge à grès, argilites, calcaires et sills volcaniques liés au volcanisme du Pic du Midi d'Ossau.

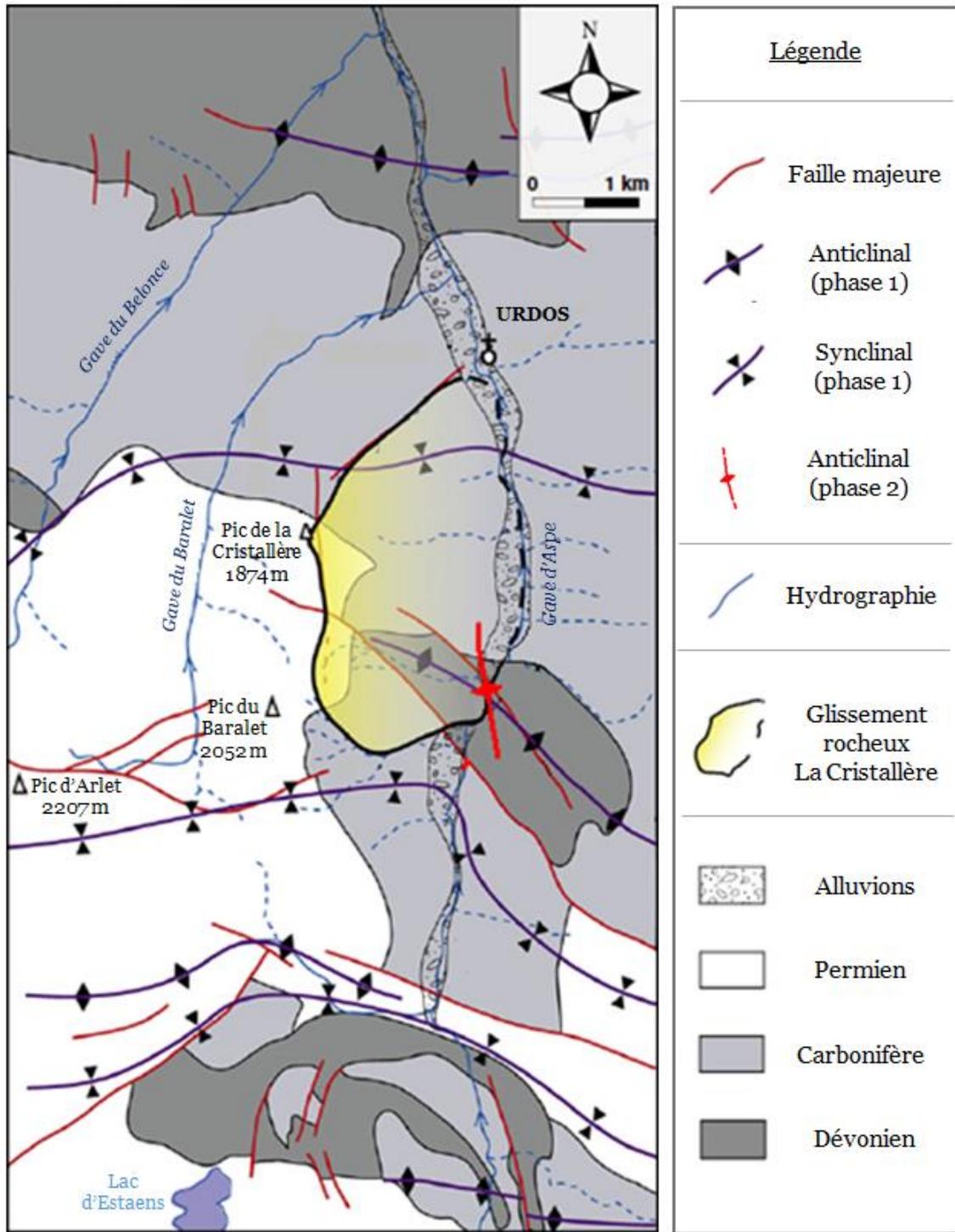


Figure II.22. Carte géologique simplifiée de la haute Vallée d'Aspe (d'après Lebourg et al., 2014 ; modifié).

Nous trouvons principalement, les calcaires du Dévonien, les schistes gréseux noirs du Carbonifère que nous appellerons coutumièrement le « Culm » ici et les schistes gréseux rouges et parfois verts, les argilites et calcaires du Permo-Trias. La carte géologique simplifiée de la haute vallée d'Aspe (cf. Figure II.22) permet de voir la disposition de ces formations ; elle révèle des structures anticlinales et synclinales qui attestent de la complexité de la zone.

Notons que les formations de l'Ère primaire sont recouvertes, à l'extrémité sud de la vallée, au niveau de la frontière franco-espagnole, par les calcaires crétacés du Mésozoïque (cf. Figure II.21). En pied de versant, elles sont aussi recouvertes par celles du Quaternaire représentées par des moraines hétérogènes (Lebourg, 2000), des cônes de déjection Tardi à Post glaciaires (Ternet et al., 2003, 2004) et au niveau du gave d'Aspe, différentes terrasses alluviales.

Précisons également que nous retrouvons à l'affleurement en parcourant les lignes de crête du massif de la Cristallère, par exemple sur la sente qui va du col de la Coumette au Pic du Baralet, des traces du volcanisme du Pic du Midi d'Ossau dans la formation du Permo-Trias (injection de sill de microdiorite). En fait, nous avons constaté sur le terrain que ces sills s'intercalent dans les niveaux schisteux rouges et entre les bancs de grès de la partie supérieure du DSL de la Cristallère que nous évoquions précédemment (cf. Figure II.21). Ces grès schisteux présentent d'ailleurs à cet endroit probablement des recristallisations de calcite qui laissent place, en surface, à des poches de dissolution centimétriques.

### **II.2.2.3 Structure tectonique du Paléozoïque**

L'architecture générale des formations géologiques de la haute vallée d'Aspe au niveau du massif de la Cristallère a été établie par des travaux de recherches d'une zone d'étude plus vaste allant jusqu'en Espagne. Parmi ces différents travaux, ceux spécifiques à l'étude structurale de la haute vallée d'Aspe sont les suivants. Il s'agit des travaux de recherche de Canérot (1964), Mirouse (1966), Majesté-Menjoulas (1968), Castéras et al. (1969), Deramond & Joseph (1972), Joseph (1973), Muller (1973), Muller & Roger (1977), Bixel & Lucas (1983), Bixel (1984), Bixel et al. (1985), Bichot (1986), Al Saffar (1993), Gilbert et al. (1994), Debon et al. (1995), Ternet et al. (2003), Canérot et al. (2004), Ternet et al. (2004).

Différentes phases de plissement ont été reconnues par ces auteurs. Elles affectent essentiellement les couches du socle Paléozoïque de la haute vallée d'Aspe, c'est-à-dire les formations du Dévonien, du Carbonifère et du Permien (ou du Permo-Trias) ; la couverture crétacée du Mésozoïque au sud du Somport est également affectée par ces phases de plissement, seulement nous nous limiterons essentiellement à décrire les terrains du Paléozoïque présents dans le secteur d'étude. Globalement ces terrains montrent l'existence

d'une tectonique polyphasée hercynienne, reprise au cours de l'orogénèse alpine suivant plusieurs phases (Bichot, 1986). Dans le secteur de la haute vallée d'Aspe, les travaux de Bichot (1986) viennent conforter ceux antérieurs de Mirouse (1966), Muller (1973), Muller & Roger (1977), Bixel & Lucas (1983), Bixel (1984), Bixel et al. (1985). Ils démontrent en fait l'existence de trois phases tectoniques à l'Hercynien (la phase 1, la phase 2 et la phase 3 ; cf. Figure II.23), qui ont été reprises par plusieurs phases alpines dont une seule (la phase 4) est reconnaissable dans le massif de la Cristallère.

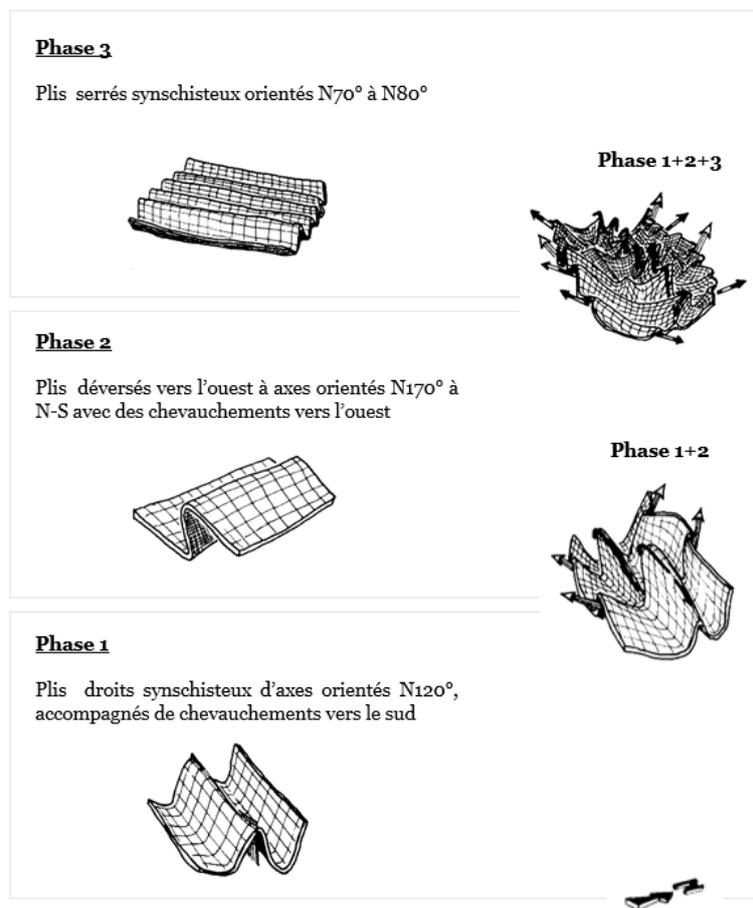


Figure II.23. Schéma explicatif des trois phases hercyniennes de plissement reconnues au sud du massif de la Cristallère au niveau du Somport d'après Bichot (1986).

Dans ce travail, nous avons fait un inventaire systématique de toutes les structures « plicatives » de la haute vallée d'Aspe afin d'en établir un schéma structural exhaustif

permettant de mieux identifier les différents objets structuraux de l'architecture générale des massifs paléozoïques : les plis anticlinaux et synclinaux, les failles majeures et les plans de chevauchement. Ainsi, en tenant compte des travaux antérieurs, de nos observations et des mesures structurales de terrain, nous avons pu reconnaître les différentes phases déjà identifiées par Bixel (1984), Bixel et al. (1985) et Bichot (1986). Nous les expliquons en y apportant, pour illustrer nos propos, des exemples significatifs. Enfin, nous présentons les coupes géologiques synthétiques S-N de la rive droite et de la rive gauche du gave d'Aspe ainsi que la carte structurale de la haute vallée d'Aspe.

### **a) La première phase hercynienne (phase 1)**

La phase 1 correspond à la formation de grands plis d'amplitude hectométrique à kilométrique orientés N120° à N140° (cf. Figure II.23), résultant d'un raccourcissement régional NE-SO (Muller & Roger, 1977). Ces plis sont associés à des rampes tectoniques chevauchantes vers le sud décrites par Al Saffar (1993) et Ternet et al. (2004). Ces auteurs montrent que les flancs nord et sud des anticlinaux sont dissymétriques et que les structures de rampe ont fonctionné dès le Carbonifère (Ternet et al., 2004). Ce sont des plis cylindriques originellement droits, à axes horizontaux montrant une schistosité de plan axial subverticale bien marquée dans les calcaires du Dévonien et les schistes gréseux du Carbonifère.

Au niveau du massif de la Cristallère, les trois structures majeures anticlinales d'amplitude hectométrique de la phase 1 sont l'anticlinal du Portalet au nord, l'anticlinal du Lazaret au centre et l'anticlinal des Forges d'Abel au sud (cf. Figure II.22). Nous retrouvons de telles structures au-delà du Lac d'Estaens en Espagne, avec des plis déversés vers le sud montrant des plans de chevauchement correspondant à des rampes tectoniques à vergence sud (Bichot, 1986). La plupart des plis associés aux rampes tectoniques chevauchantes sont coniques et montrent une schistosité de plan axial de direction N140°E. Des failles N120° à N140° de pendage NE sont associées à ces plis (Bichot, 1986).

### **b) La deuxième phase hercynienne (phase 2)**

La phase 2 correspond à la formation de grands plis d'amplitude kilométrique orientés N170° à N-S. Ce sont des plis cylindriques ou coniques, déversés vers l'ouest (cf. Figure II.23). Les axes des plis sont subhorizontaux avec un clivage d'orientation moyenne N165°E et un pendage 60°E (Bichot, 1986) ; cette phase 2 est notée SV2 par Muller & Roger (1977). Elle a été surtout reconnue et cartographiée immédiatement à l'est du massif de la Cristallère en vallée d'Ossau au niveau du Pic du Midi (axes de plis N145° à N-S ; Bixel et al, 1985). Comme cette seconde phase se surimpose à la première phase notée SV1, elle implique un redressement des axes des plis de la phase 1 (phase 1 + 2 ; cf. Figure II.23).

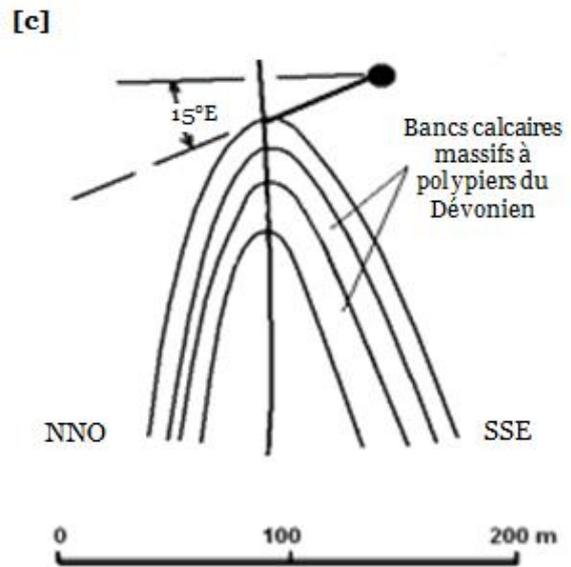
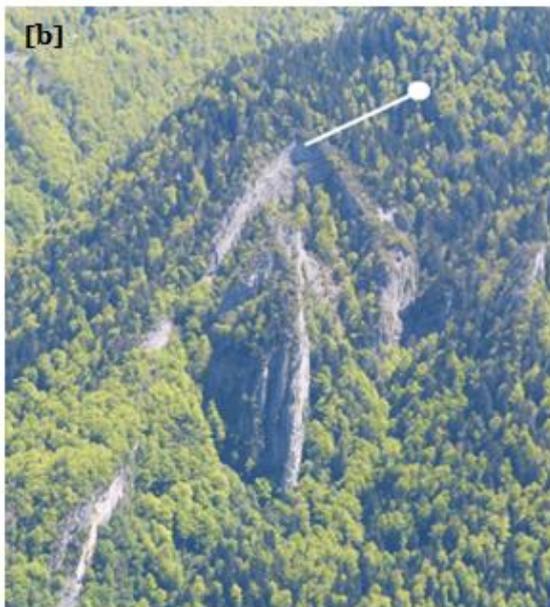
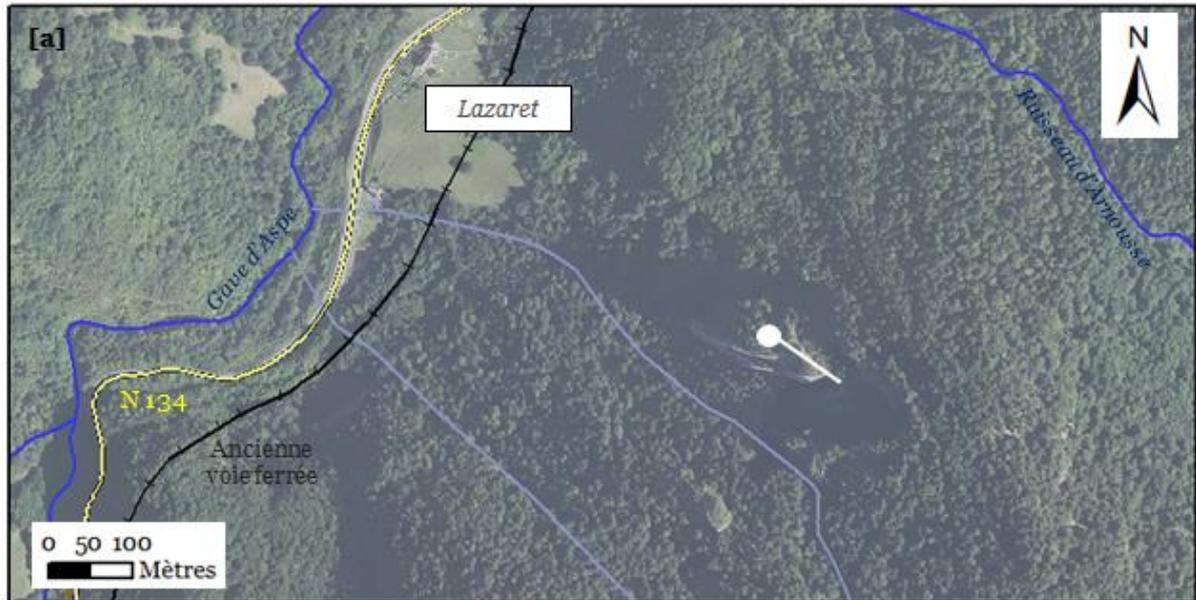


Figure II.24. L'anticlinal du Lazaret affecte les calcaires du Dévonien avec son axe de pli hectométrique de la première phase hercynienne N120°, fortement redressé par la deuxième phase de direction subméridienne N-S : ortho-image 2012 de l'IGN annotée (récupérée sur <http://professionnels.ign.fr/> en mars 2016) montrant la position de la charnière et l'axe de pli en blanc [a] ; prise de vue de la charnière de l'anticlinal depuis l'ouest [b] et son schéma explicatif (l'axe est positionné avec son plongement de 15° vers l'est) [c].

En rive gauche du gave d'Aspe, au niveau du site expérimental, l'axe de l'anticlinal du Lazaret (ou de la Pène du Thès) de la phase 1 est courbé et plonge de 5° à 10° vers l'ouest, alors qu'en rive droite l'axe du même pli est très fortement redressé avec un plongement inverse vers l'est de 15° à 20° (cf. Figure II.24). Cette courbure de l'axe de la phase 1 se fait autour d'un axe subméri dien de la phase 2 (cf. Figure II.24).

Des plans de chevauchement à vergence ouest accompagnent la phase 2. Ils ne sont pas visibles sur le massif de la Cristallère. Ils ont été observés plus au sud, dans le cirque d'Espélunguère par Bichot (1986). La phase 2 (pli et chevauchement) est associée à des jeux cisailants dextres le long des failles N170°E et à des jeux senestres le long des failles N70°E (Bichot, 1986). Toutefois, ces deux familles d'accidents ont été essentiellement reconnues en rive gauche du gave d'Aspe et affectent profondément le massif de la Cristallère. Il s'agit des grands accidents N170° à N-S qui conditionnent les zones d'effondrement comme celui du DSL de La Cristallère.

### **c) La troisième phase hercynienne (phase 3)**

La phase 3 n'a pas été reconnue en haute Vallée d'Aspe. Elle est seulement visible en Espagne, au sud du Somport, dans le massif de Tobazo où nous pouvons observer des plis cylindriques orientés N70° à N80° (cf. Figure II.23).

### **d) La phase alpine (phase 4)**

La phase 4 est une tectonique « plicative » à vergence sud avec des plis en genou d'ampleur hectométrique d'orientation axiale N95° à N100°, bien décrits et cartographiés par Bixel et al (1985), Bichot (1986) ou avant par Muller & Roger (1977). Ces plis se surimposent et reprennent obliquement ceux de la deuxième phase hercynienne (Muller & Roger, 1977). La structure tectonique de cette phase de déformation est la mieux décrite au niveau du col du Somport dans les formations du Permien et du Crétacé puisqu'elle domine la structuration plissée des massifs de la vallée d'Aspe.

L'exemple le plus démonstratif des nombreux plis en genou à vergence sud qui affectent le Permien est le pli anticlinal déversé vers le sud du Pic du Baralet (cf. Figure II.25), ou même le synclinal de la montagne d'Espélunguère. Les plis déversés vers le sud (plis en genoux), montrent des flancs sud courts, verticaux ou légèrement déversés vers le nord (flanc inverse), ou déversés à couchés comme dans le tunnel du Somport. Ces plis en genou sont surtout visibles sur les lignes de crête entre le Pic du Baralet et le Pic de Gabedaille en rive gauche du gave d'Aspe, et entre le Pic du Larry et le Pic de Benou en rive droite. Ce sont des plis hectométriques visibles sous les crêtes dans les versants entre 1500 et 2200 mètres d'altitude.

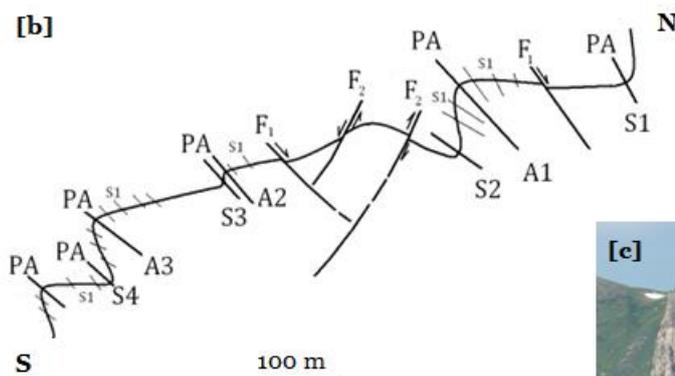
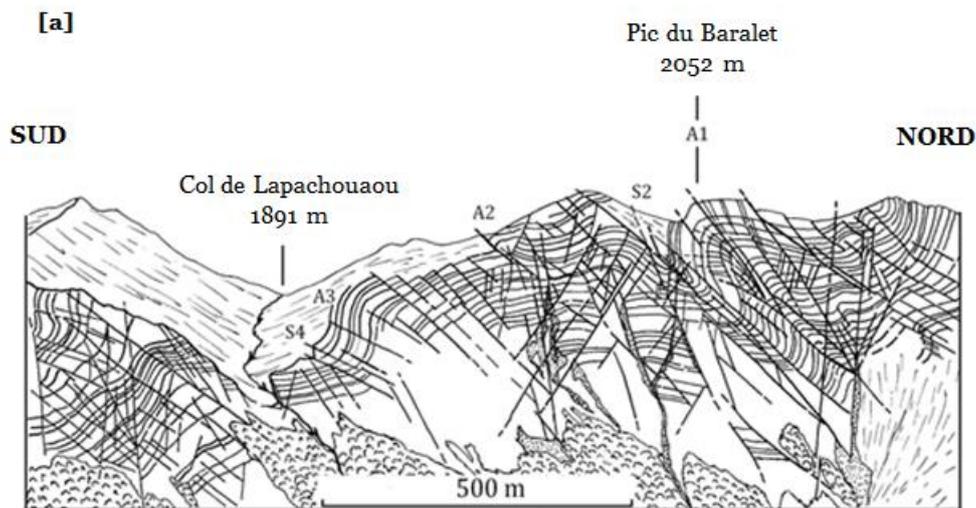
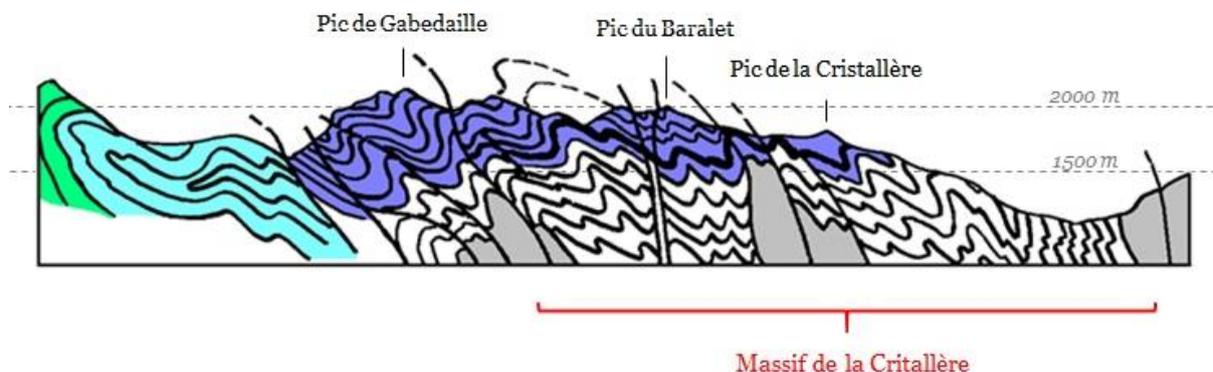


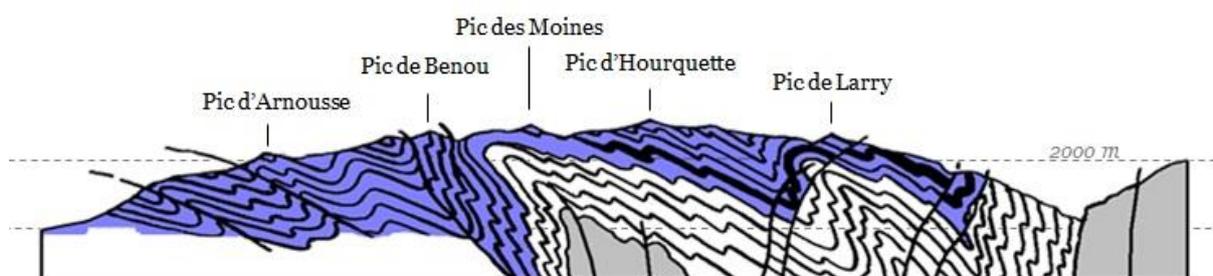
Figure II.25. Coupe synthétique S-N des structures plicatives de la phase 4 en rive gauche du gave d'Aspe entre le col le Lapachouaou et le Pic du Baralet [a]. Schéma récapitulatif des plis en genou déjetés vers le sud (A1 à S4) avec les plans de schistosité  $s_1$  de la phase 4 (schistosité de clivage notée SA2 par Bixel et al., 1985), et les failles conjuguées F1 et F2 tardives  $N90^\circ$  à  $N110^\circ$  [b]. Photographie de détail de la charnière anticlinale A1 du Pic du Baralet (pli en genou) qui montre les plans de clivage de la schistosité S1 inclinés de  $45-55^\circ$  nord [c].

Une coupe géologique générale du style tectonique d'ensemble de la haute vallée d'Aspe a déjà été établie en rive gauche (Lebourg, 2000 & Lebourg et al., 2003 ; cf. Figure II.26a). Nous avons établi à partir de ces éléments celle de la rive droite (cf. Figure II.26b).

**[a]** Rive gauche du gave d'Aspe



**[b]** Rive droite du gave d'Aspe



SUD

5 km

NORD

 Crétacé  
 Permien

 Carbonifère calcaire  
 Carbonifère à faciès « Culm »

 Dévonien

Figure II.26. Coupes géologiques synthétiques S-N de la rive gauche [a] (d'après Lebourg, 2000 & Lebourg et al, 2003 ; modifié) et de la rive droite [b] de la haute Vallée d'Aspe.

Nous avons cartographié l'ensemble des plis de détail de manière à en avoir une bonne représentation ; ils ont été construits à partir de la trace topographique des plans axiaux des plis anticlinaux et synclinaux. La carte structurale de la haute Vallée d'Aspe ci-après synthétise donc l'ensemble de nos observations (cf. Figure II.27 ; Fabre et al., 2016). Les plis hercyniens (SV1) sont repris par la phase alpine (phase 4 ou SA2) (Muller & Roger, 1977 ; Bixel et al, 1985).

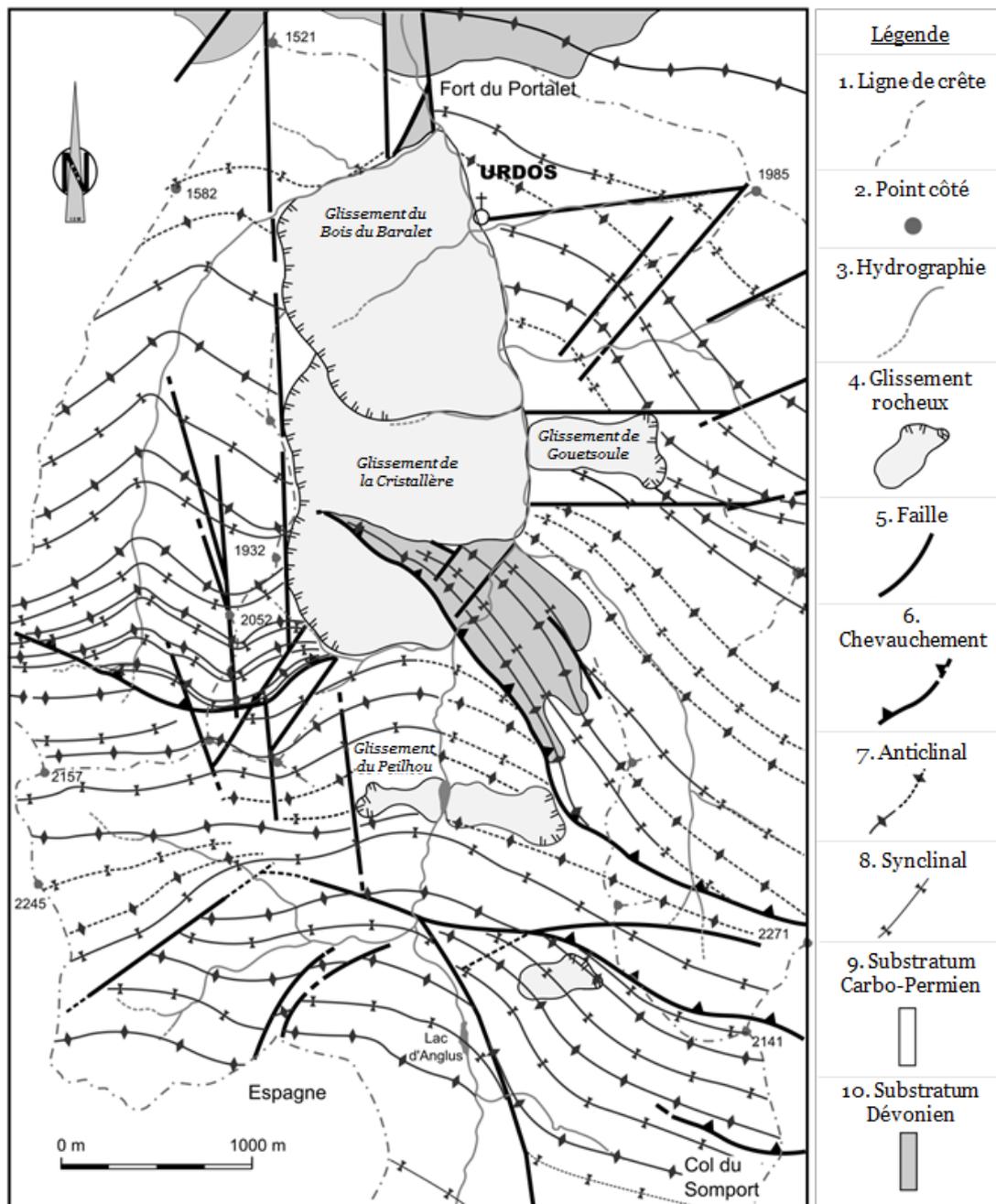


Figure II.27. Carte structurale de la haute vallée d'Aspe montrant : a) la trace cartographique des principaux axes de plis anticlinaux et synclinaux (7 et 8) liés à la tectonique polyphasée hercynienne et alpine (SV1, SA2 et nappe) ; b) les principaux accidents N50°, N90°, N170° et N-S (5) et les accidents chevauchants hercyniens repris et tordus à l'alpin (6) (Fabre et al, 2016 ; modifié).

À cette tectonique « plicative » sont associés des plans de chevauchement à vergence sud visibles vers le col du Somport, probables rejeux d'anciens plans de chevauchement hercyniens (rampes tectoniques de chevauchement de la phase 1 ; Muller & Roger, 1977). Ces auteurs notent la phase 4 comme « phase majeure 2 » de la tectonique alpine, avec une schistosité de clivage notée SA2 (schistosité de plan axial phase 2). Leur coupe structurale synthétique de la « zone axiale des Pyrénées » résume l'ensemble des déformations de la haute Vallée d'Aspe (cf. Figure II.28). La phase 4 induit une reprise majeure des phases hercyniennes 1 et 2, notées SV1 et SV2 (Muller & Roger, 1977), sans toutefois modifier la direction originelle N120° des grandes structures antérieures hercyniennes. Cette reprise alpine induit une faible torsion des axes de plis hercyniens, mais une torsion plus marquée des failles et des grands accidents préexistants (N70°, N80°, N120°, N140° et N170°). Ces torsions des grands accidents jouent un rôle non négligeable dans la mise en place des grands glissements rocheux.

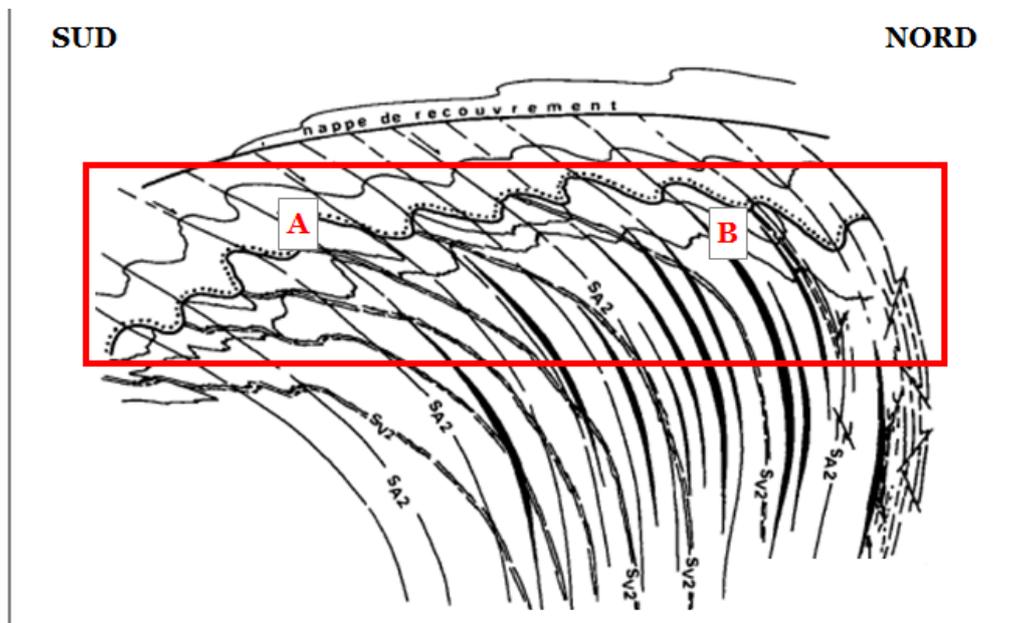


Figure II.28. Coupe structurale schématique de la « zone axiale » des Pyrénées (d'après Muller et Roger, 1977) montrant la courbure des axes de plis de la phase hercynienne SV2 et de la phase alpine SA2 en liaison avec une nappe de recouvrement tardive alpine. L'encart rouge positionne les coupes géologiques synthétiques S-N des rives gauche et droite de la haute Vallée d'Aspe (cf. Figure II.26) où A correspond aux Pics de Gadebaille/Arnousse et B aux Pics de Larry/Cristallère.

### II.2.3 LES INSTABILITES GRAVITAIRES DU MASSIF DE LA CRISTALLERE

Les massifs paléozoïques de la haute Vallée d'Aspe sont affectés par de nombreux mouvements de terrain de natures différentes (chute de blocs, glissement de terrain, glissement rocheux, etc.) et de dimensions variables (Lebourg, 2000 ; Fabre et al., 2000 ; 2002). Le massif de la Cristallère n'y échappe pas puisqu'au moins trois principales instabilités gravitaires affectent le substratum rocheux paléozoïque du versant est, soit : le glissement complexe du Peilhou au sud du massif de la Cristallère, le DSL de la Cristallère dans la partie centrale (Lebourg et al., 2014) et le glissement du Bois du Baralet au nord (Fabre et al., 2016 ; cf. Figure II.27). Dans ce travail de recherche, nous allons axer notre étude essentiellement sur le DSL de la Cristallère, mais également ponctuellement sur les deux autres glissements rocheux qui encadrent au nord et au sud le DSL de la Cristallère. Dans un schéma plus général, notons que ces trois instabilités gravitaires s'intègrent dans la déstabilisation générale complexe du massif rocheux de la rive gauche de la haute Vallée d'Aspe (Fabre et al., 2000 ; 2002 ; Fabre et al., 2016).

#### II.2.3.1 Le DSL de la Cristallère (Lebourg et al., 2014)

Lebourg et al. (2014) ont identifié à partir des morphostructures observées sur massif de la Cristallère (double crête, contre-pentes et escarpements notamment), un DSL (cf. Figure II.29). Ils précisent que le DSL de La Cristallère affecte ainsi sur environ 3 km<sup>2</sup> la partie est du versant comprise depuis le sud entre les sommets suivants : le Pic du Baralet (2052 mètres) et le Pic de la Cristallère (1874 mètres, cf. Figure II.29). C'est l'un des plus grands DSL cartographiés aujourd'hui dans les Pyrénées (Lebourg et al., 2014) : la surface de rupture est estimée entre 300 et 400 mètres de profondeur et le volume mobilisé à environ 1400 millions de m<sup>3</sup>.

Pour contraindre l'âge (l'initiation du mouvement) de ce DSL et en comprendre sa dynamique passée, deux méthodes de datation ont été utilisées par ces auteurs au niveau de l'escarpement principal (cf. Figure II.29) :

- i) La mesure des cosmonucléides <sup>10</sup>Be produits in situ à partir de quatre échantillons de quartz extraits le long d'un profil vertical au niveau du Pic de la Cristallère (cf. « datation quartz Be », Figure II.29a) ;
- ii) L'analyse des dépôts sédimentaires d'un petit lac situé à environ 60 mètres en contrebas de l'escarpement principal du Pic de la Cristallère, au niveau du Col de la Coumette, quelques mètres plus au sud (cf. « datation sédimentation lac », Figure II.29a).

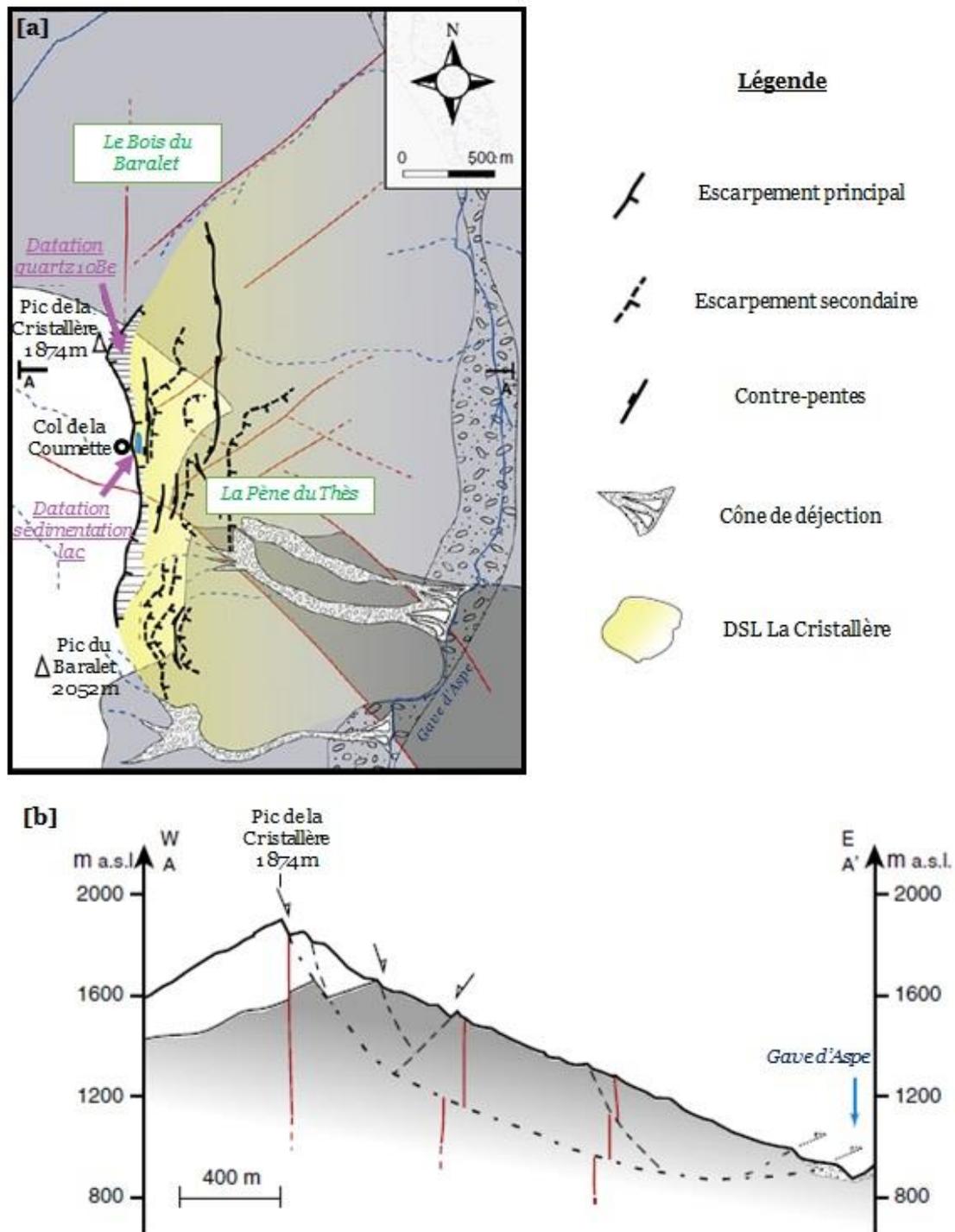


Figure II.29. Le DSL de la Cristallère (Lebourg et al., 2014 ; modifié) : carte morphostructurale montrant les caractéristiques principales de déformation [a] et coupe simplifiée [b]. Légende complémentaire : Figure II.22.

L'estimation du taux de sédimentation des dépôts du lac formé au pied de l'escarpement principal est de  $0,86 \pm 0,57$  mm/an (Lebourg et al., 2014), permet d'obtenir pour une épaisseur moyenne de sédiments de 95 centimètres à partir de 10 prélèvements un âge approximatif de la formation du lac de  $1106 \pm 540$  ans. Notons que les travaux de Lebourg et al. (2014) permettent de préciser que celui-ci se serait formé après l'initiation du mouvement.

Ces auteurs ont également obtenu à partir des datations isotopiques du Béryllium (mesure du  $^{10}\text{Be}$ ) des résultats remarquables sur la cinématique du DSL de la Cristallère, même s'ils considèrent que la résolution est contrainte par le manque de quartz affleurants. En effet, l'analyse du premier échantillon de quartz extrait à une altitude de 1874 m au niveau de l'escarpement principal donne un âge approximatif de  $1299 \pm 62$  ans, le deuxième échantillon extrait à une altitude de 1869 m donne  $881 \pm 68$  ans, le troisième échantillon extrait à une altitude de 1852 m donne  $929 \pm 64$  ans et enfin le quatrième et dernier échantillon extrait à une altitude de 1850 m donne  $1083 \pm 78$  ans.

L'ensemble de ces données suggèrent pour Lebourg et al. (2014) deux scénarios possibles pour expliquer la déstabilisation du versant, bien qu'ils privilégient le deuxième, soit :

- i) Une initiation du DSL il y a 1300 ans suivit d'une déformation lente et progressive, puis une accélération autour de 960 ans suite à un tremblement de terre ou un facteur climatique ;
- ii) Un événement unique il y a 1300 ans que les auteurs mettent en relation directe avec le tremblement de terre du Lavédan en l'an 580 (cf. partie II.2.1.6).

À l'issue de ces éléments de datation sur l'instabilité rocheuse du massif de la Cristallère sur plus d'un millénaire par Lebourg et al. (2014), nous nous sommes posés la question de savoir si le DSL de la Cristallère était encore actif aujourd'hui sur la dernière décennie (à court terme) ? En effet, à notre connaissance, aucune étude ni suivi de ce versant dans son ensemble sur le court terme n'existait jusqu'en 2013, en dehors des travaux de l'ONF/RTM dans la partie centrale du massif de la Cristallère (zone active du DSL de la Cristallère) couvrant quelques centaines de mètres carrés. Comme nous l'avons dit précédemment, l'étude de la cinématique (instrumentation, surveillance) à court terme d'un DSGSD et d'un DSL est rarement abordée dans les travaux scientifiques, sinon à long terme par les datations isotopiques. Nous expliquions également que l'un des défis de la communauté scientifique où des lacunes subsistent est la dynamique temporelle à court et moyen terme d'un DSGSD et d'un DSL (cf. partie II.1.3). Aussi, dans la suite de ce travail nous allons apporter des éléments de réponse à

la question posée : quelle dynamique à court terme pour une instabilité gravitaire de grande ampleur dans les Pyrénées ? (cf. partie IV. Résultats et discussion).

### **II.2.3.2 La Pène du Thès : une zone active du DSL de la Cristallère**

La Pène du Thès est une instabilité gravitaire superficielle qui correspond à la zone la plus active du DSL de la Cristallère (cf. Figure II.29). Nous présentons le suivi à moyen terme assuré par nos soins en 2013 puis le suivi à court terme réalisé par le service ONF/RTM depuis 1991.

#### **a) Suivi à moyen terme (Thomas, 2013 ; Thomas et al, 2013)**

Nous avons effectué en 2013 une corrélation des ortho-images aériennes historiques qui nous a permis de mettre en évidence les évolutions au niveau de la zone la plus active du DSL de la Cristallère entre les années 1948 et 1978 (30 ans), entre les années 1978 et 1998 (20 ans) et entre les années 1998 et 2008 (10 ans). Nous avons retenu 2 périodes majeures au cours desquelles des changements s'opèrent au niveau de la zone active du DSL de la Cristallère (cf. Thomas, 2013 ; Thomas et al, 2013).

#### Corrélation des ortho-images aériennes historiques

Pour effectuer la corrélation entre les images aériennes, nous avons récupéré les ortho-images aériennes de l'IGN des années 1998 et 2008 et les différents clichés historiques disponibles notamment les années 1948 et 1978. Pour les prises de vues de 1948 et de 1978, les distorsions ont été supprimées géométriquement avant toute corrélation. Nous avons effectué une orthorectification par RPC (« *Rational Polynomial Orthorectification* ») qui a été réalisée en utilisant le logiciel ENVI d'EXELIS (Thomas, 2013).

Deux informations indispensables que sont la focale et les coordonnées des repères de fond de chambre ont été récupérées dans le certificat de calibration fourni par la photothèque nationale de l'IGN. En l'absence de certificat de calibration pour l'année 1948, une approximation quant aux repères de fond de chambre a dû être envisagée. La meilleure approximation a bien évidemment été retenue.

Finalement, ces informations couplées aux points de contrôles ont permis de modéliser le capteur lors des prises de vue et de créer des images planimétriques par drapage. Ainsi, les 4 ortho-images aériennes ont été intégrées dans un SIG (Système d'Information Géographique) pour mesurer les déplacements entre chacune d'elle et mettre en évidence les changements.

### Période 1948-1978

Dès 1948, une succession d'escarpements traduisent l'existence d'une instabilité gravitaire avec un mouvement soit rétrograde vers l'amont, soit prograde vers l'aval (cf. Figure II.30a). Bien qu'il ne soit pas possible, de préciser ici si l'évolution de l'instabilité gravitaire est prograde ou rétrograde, le mouvement rétrograde se confirme par la suite. Sur l'ortho-image de 1978, l'instabilité se traduit par un arrachement important dans la zone sud (cf. Figure II.30b). Précisons que cette zone marque le contact entre le Carbonifère et le Dévonien soit vers 1650 m d'altitude. Cet arrachement important est marqué par un escarpement sans végétation qui a engendré un déplacement planimétrique de deux plateaux sur 80 m. La période au cours de laquelle s'est produit cet arrachement est postérieure à 1964, puisque sur les prises de vues de 1964, cet arrachement n'est pas visible (cf. Thomas, 2013).

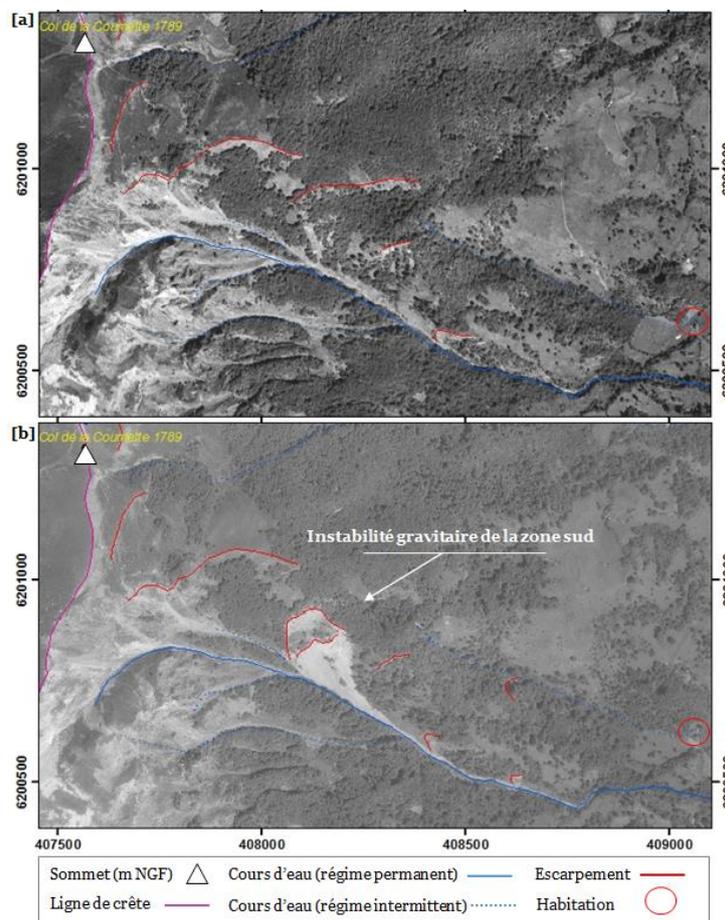


Figure II.30. Évolution de la Pène du Thès - images aériennes IGN rectifiées de [a] 1948 et [b] 1978 (Thomas, 2013 ; modifié). Projection RGF93 Lambert 93. Commentaires dans le texte.

## Période 1978-2008

Sur l'ortho-image aérienne de 1998 (cf. Figure II.31a), nous remarquons l'apparition d'un second arrachement important de 50 m qui s'est produit un peu plus au nord. Cet arrachement est limitrophe à l'arrachement décrit précédemment. Il a induit des désordres plus en aval et mis en péril une maison qui pour information a été détruite à la fin de l'année 2013. Cette dernière a été impactée directement par les matériaux charriés de cette zone vers l'aval par un talweg torrentiel. Dans cette zone on observe une progression dans le temps de la zone d'arrachement vers l'amont entre 1978 et 1998. Il apparaît donc qu'au sein de cette zone un mouvement rétrograde s'est produit entre 1978 et 1998 en induisant une succession de glissements de débris emboîtés (cf. Figure II.30b & Figure II.31). C'est dans cette zone que des fissures mécaniques en décompression ont été observées sur le terrain (Thomas, 2013).

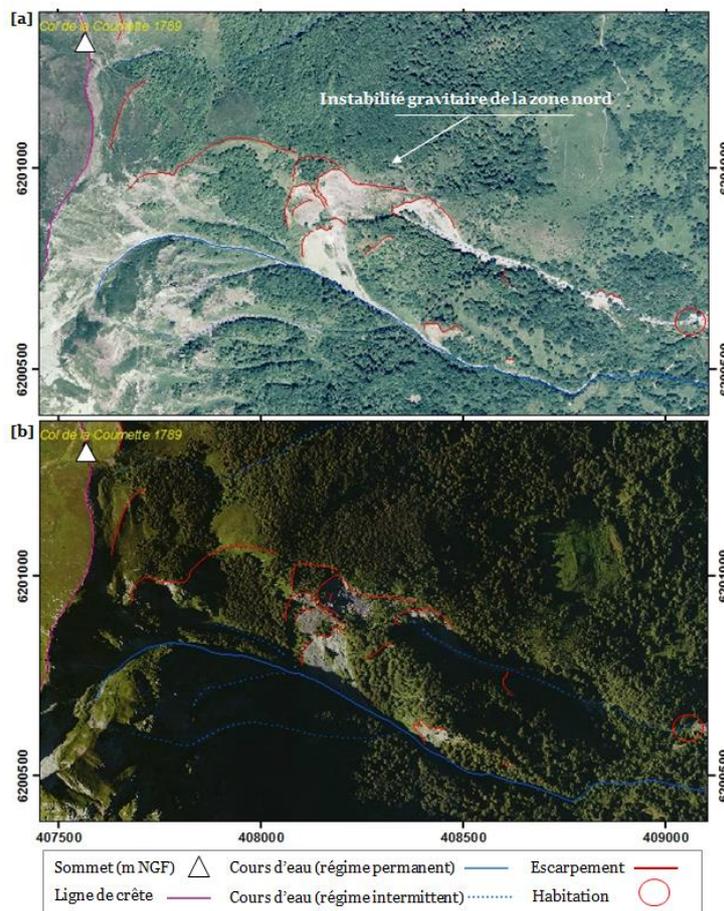


Figure II.31. Évolution de la Pène du Thès - ortho-images aériennes IGN de [a] 1998 et [b] 2008 (Thomas, 2013 ; modifié). Projection RGF93 Lambert 93. Commentaires dans le texte.

## b) Suivi à court terme

Le suivi topographique de cette zone (cf. Figure II.32) est assuré depuis 1991 par le service ONF/RTM pour la commune de Borce.

### Principe des mesures

L'implantation des points cibles a été réalisée en 3 phases : les points cibles 1 à 10 ont été placés en octobre 1991, les points cibles 11 à 13 en juin 1996 et les points cibles 14 à 23 en juillet 2006 (cf. Figure II.32). À partir de la station de visée  $S_{RF}$  (théodolite électronique) et du point de référence n°1 implantés tous deux sur la barre rocheuse du calcaire dévonien, trois informations permettent de positionner chaque point cible dans l'espace, ce sont : i) la distance suivant l'axe de visée (H), ii) l'angle horizontal que forment l'axe entre la station-point cible n°1 et le point cible avec une mesure angulaire faite dans le sens horaire en grade (A) et la côte altimétrique (Z). La position spatio-temporelle des points cibles s'obtient donc par triangulation à partir de H, A et Z.

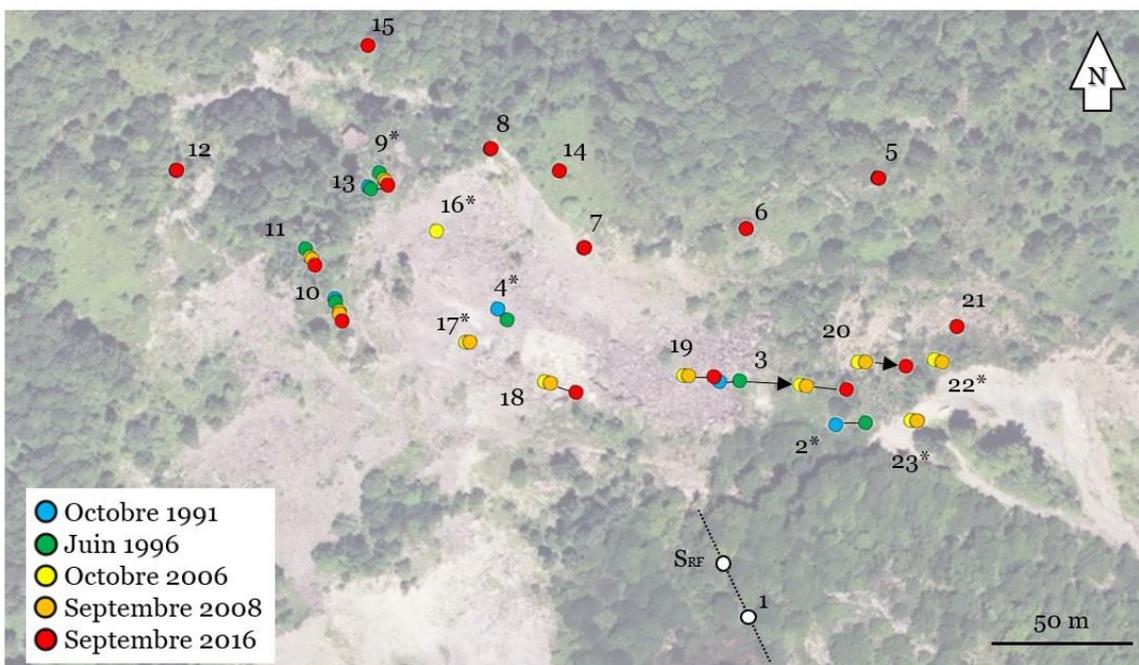


Figure II.32. Suivi de l'évolution de la Pène du Thès. Illustration réalisée à partir des données ONF/RTM (Dufour, 2016). Cf. « instabilité gravitaire de la zone nord », Figure II.31a pour localiser la zone de suivi. Fond ortho-image 2012 de l'IGN récupérée sur <http://professionnels.ign.fr/> en mars 2016.

### Evaluation spatio-temporelle des déplacements totaux

Les résultats des mesures permettent de distinguer deux zones où sont positionnés les points cibles : la première se situe au cœur de la zone d'arrachement et la seconde sur le pourtour (cf. Figure II.32). La première zone correspond aux points cibles où les déplacements totaux sont supérieurs à 10 m et pouvant aller jusqu'à près de 57 m pour le point cible n°3, tandis que la seconde zone, située sur le pourtour de l'escarpement principal de la zone active, montre des déplacements plus faibles (cf. Tableau II.6).

Tableau II.6. Déplacements totaux cumulés en mètres des points cibles depuis leurs implantations (d'après Dufour, 2016 ; extrait). (I) : implantation d'un point cible. (D) : disparition d'un point cible.

Point cible n°	Octobre 1991	Juin 1996	Juillet 2006	Octobre 2006	Septembre 2008	Septembre 2013	Septembre 2014	Octobre 2015	Septembre 2016
<b>1</b>	<b>I</b>	<b>0,02</b>	<b>0,06</b>	<b>0,06</b>	<b>0,08</b>	<b>0,13</b>	<b>0,19</b>	<b>0,20</b>	<b>0,20</b>
2	I	<b>11,97</b>	D	D	D	D	D	D	D
<b>3</b>	<b>I</b>	<b>8,29</b>	<b>35,72</b>	<b>36,13</b>	<b>39,41</b>	<b>50,92</b>	<b>53,14</b>	<b>54,81</b>	<b>56,12</b>
4	I	<b>7,35</b>	D	D	D	D	D	D	D
5	I	0,09	0,80	0,81	0,84	1,22	1,28	1,31	1,31
6	I	0,54	1,04	1,04	1,07	1,31	1,36	1,40	1,40
7	I	0,12	1,15	1,15	1,18	1,42	1,47	1,51	1,51
8	I	0,74	2,20	2,22	2,27	2,64	2,71	2,76	2,76
9	I	2,26	D	D	D	D	D	D	D
10	I	2,43	<b>7,69</b>	<b>7,78</b>	<b>8,82</b>	<b>11,52</b>	<b>12,01</b>	<b>12,32</b>	<b>12,57</b>
11	-	I	4,90	4,97	<b>5,93</b>	<b>8,49</b>	<b>8,92</b>	<b>9,23</b>	<b>9,44</b>
12	-	I	0,84	0,87	0,92	1,58	1,67	1,77	1,77
13	-	I	4,97	<b>5,04</b>	<b>5,98</b>	<b>9,48</b>	<b>10,12</b>	<b>10,41</b>	<b>10,59</b>
14	-	-	I	I	0,10	0,5	0,58	0,61	0,61
15	-	-	I	0,05	0,12	0,5	0,59	0,64	0,64
16	-	-	I	0,17	6,77	D	D	D	D
17	-	-	I	0,04	1,81	D	D	D	D
18	-	-	I	0,19	2,41	<b>9,91</b>	<b>11,58</b>	<b>12,81</b>	<b>13,79</b>
19	-	-	I	0,21	2,74	<b>9,53</b>	<b>10,96</b>	<b>12,32</b>	<b>13,17</b>
20	-	-	I	0,4	3,81	<b>15,53</b>	<b>17,83</b>	<b>19,51</b>	<b>20,84</b>
21	-	-	I	0,04	0,17	0,51	0,58	0,61	0,61
22	-	-	I	0,58	3,95	<b>17,14</b>	D	D	D
23	-	-	I	I	2,75	D	D	D	D

Précisons que les points cibles n°14 et 23 ont été implantés en juillet 2006, mais les premières mesures ont été réalisées par les services ONF/RTM à partir d'octobre 2006.

Notons la disparition de ces 7 points cibles entre les campagnes de mesures suivantes (cf. Figure II.32 & Tableau II.6) :

- i) Le point cible n°2 entre octobre 1998 et juin 1999 ;
- ii) Le point cible n°4 entre octobre 1997 et août 1998 ;
- iii) Le point cible n°9 entre juin 2000 et octobre 2001 ;
- iv) Le point cible n°16 entre octobre 2010 et septembre 2011 ;
- v) Le point cible n°17 entre octobre 2012 et septembre 2013 ;
- vi) Le point cible n°22 entre septembre 2013 et septembre 2014 ;
- vii) Et le point cible n°23 entre septembre 2008 et octobre 2009.

Nous avons en 2013 distingué trois phases d'évolution avec une accélération des déplacements à partir de l'année 1996 et une décélération à partir de l'année 2003 (Thomas, 2013). Dans le cœur de la zone d'arrachement, nous avons noté par exemple pour le point cible n°3 une vitesse moyenne de 1,8 m/an entre les années 1991 et 1996, de 3,1 m/an entre les années 1996 et 2003, et de 1,9 m/an entre les années 2003 et 2008 (Thomas et al, 2013).

Nous remarquons que la station de visée  $S_{RF}$  pour les mesures semble aussi affectée par des déplacements puisque les déplacements totaux cumulés du point cible n°1 qui sert de référence et positionné à cet endroit enregistre une évolution entre 1991 et 2016 (cf. Tableau II.6) ; ce qui contraint les déformations mesurées en données relatives, mais indique de toute évidence des déplacements métriques. Les résultats annoncés d'un point de vue quantitatif sont donc à prendre avec une certaine réserve.

### II.3 SYNTHÈSE DE L'ÉTAT DES CONNAISSANCES ET DU CADRE DE L'ÉTUDE

Le « Deep-Seated Gravitational Slope Deformation » (DSGSD) est un terme générique utilisé pour désigner un mouvement de masse, lent et profond, affectant un substratum rocheux d'un versant en montagne. Il résulte de la gravité, il affecte de grandes portions de versant ; il évolue sur de très longues périodes de temps et il déplace des volumes de roches considérables (million de m<sup>3</sup>).

Alors que la délimitation et l'identification d'un DSGSD restent délicates et difficiles tant par sa taille que par le fait qu'il affecte le plus souvent la totalité du massif rocheux, sans qu'il y ait possibilité d'y trouver la zone de rupture sinon très profondément ; les « Deep-Seated Landslide » (DSL) sont bien mieux identifiables géomorphologiquement dans le versant montagneux : la surface de rupture est visible sinon évidente. Une manière simplifiée de comparer et localiser un DSL par rapport à un DSGSD dans un versant montagneux instable serait de dire que les DSL sont contenus dans un DSGSD, et qu'ils peuvent de surcroît être un indice de l'existence d'un DSGSD.

Toutefois, beaucoup de questions subsistent sur la dynamique temporelle à court terme et moyen terme d'un DSGSD. Cela reste l'un des aspects le moins étudié aujourd'hui par la communauté scientifique (cf. partie II.1.3). Le nombre de cas d'études a effectivement augmenté au cours des dernières décennies puisque de nombreuses études de cas de DSGSD ont été recensées un peu partout dans les régions les plus élevées de la planète, qu'il s'agisse de DSGSD cartographiés, datés ou encore de DSGSD surveillés. Seulement les connaissances sur le comportement et l'évolution d'un DSGSD au cours du temps (court terme) restent encore basées sur un nombre limité de cas d'études de DSGSD datés ou surveillés. Nous proposons avec ce travail d'y répondre (cf. partie IV. Résultats et discussion).

Nous avons choisi comme site d'étude un massif montagneux qui se trouve dans les Pyrénées françaises (cf. partie II.2), où le DSL de La Cristallère a été récemment identifié (Lebourg et al., 2014). Ces scientifiques ont contraint l'âge et évalué sa dynamique passée, à partir de deux méthodes de datation au niveau de l'escarpement principal, par : i) la mesure des cosmonucléides du <sup>10</sup>Be produits in situ et ii) l'analyse des dépôts sédimentaires d'un petit lac confiné au pied de l'escarpement principal.

Afin que d'une part cette étude de cas soit l'une des plus complètes (connaissance de la dynamique passée et de la dynamique actuelle) et d'autre part que nous puissions répondre à la demande de la communauté scientifique, nous avons instrumenté et surveillé ce massif rocheux, avec notamment : i) les mesures de positionnement par satellite GNSS différentiel (DGNSS, « Differential Global Navigation Satellite System ») et ii) les surveillances aériennes

avec un drone du type aile volante (cf. partie III. Méthodologie). Soulignons que des relevés complémentaires (mesures structurales et géophysiques) ont également été réalisés en parallèle.

### III. METHODOLOGIE



Nous développons dans cette partie la méthodologie retenue pour les deux applications complémentaires nouvelles ou récentes utilisées dans le cadre de ce travail :

- i) l'une s'avère être plus complexe qu'il n'y paraît en raison certainement de la banalisation qui en est faite aujourd'hui ; il s'agit du positionnement de repères artificiels ou naturels par satellites ;
- ii) l'autre est nouvelle et présente un engouement sociétal prononcé depuis peu ; il s'agit des observations aériennes avec un drone ;

Dans une première partie (cf. partie III.1) nous présentons les outils et les méthodes choisies dans le cadre de cette étude pour le positionnement par satellites DGNS (« Differential Global Navigation Satellite Systems ») avec les deux constellations suivantes : la constellation américaine GPS (« Global Positioning System ») et la constellation russe GLONASS (acronyme russe). Nous verrons qu'à cet endroit des Pyrénées, nous nous trouvons dans un cas particulier où une méthode plébiscitée aujourd'hui eu égard de sa faculté apparente d'utilisation n'est pas suffisante. Nous présentons en fait une application tombée en désuétude au moment même où nous commençons nos relevés : le pivot temporaire.

Dans une deuxième partie (cf. partie III.2), nous présentons le type de drone que nous avons choisi pour effectuer nos relevés aériens : une aile volante équipée d'un capteur spectral RGB (« Red Green Blue » ou Rouge Vert Bleu en français). Nous revenons rapidement sur le principe de la photogrammétrie assistée par ordinateur et les différentes étapes nécessaires pour obtenir des données de qualité avec cet outil.

Cette combinaison de données ponctuelles (le positionnement par satellites avec pivot temporaire) et surfaciques (les observations aériennes avec un drone type aile volante) s'est avérée prometteuse pour notre étude (cf. partie IV. Résultats et discussion) et plus généralement pour l'étude des instabilités gravitaires de grande ampleur : nous exposons ici l'ensemble des mesures et observations réalisées sur le massif de la Cristallère y compris les relevés géophysiques complémentaires réalisés en parallèle (cf. partie III.3).

## **III.1 OUTILS ET METHODES POUR LE POSITIONNEMENT PAR SATELLITES DGNSS AVEC LES CONSTELLATIONS GPS & GLONASS**

Les applications liées au positionnement par satellites sont complexes malgré la banalisation qui en est faite aujourd'hui. Nous exposerons donc tout d'abord brièvement le principe du positionnement par satellites et les notions essentielles pour comprendre la suite de ce travail. Nous soulignerons ainsi l'intérêt d'utiliser une méthode qui n'est aujourd'hui pas ou plus plébiscitée par la communauté scientifique, pourtant nécessaire ici : le pivot temporaire (cf. partie III.1.1). Nous présenterons ensuite l'ensemble des points cibles permanents disposés sur le massif de la Cristallère et le rôle attribué à chacun d'entre eux (cf. partie III.1.2). Nous expliquerons enfin les principales étapes de notre méthodologie appliquée sur ce site (les différentes étapes pour l'acquisition et le traitement des données tridimensionnelles) afin qu'elles soient reproductibles dans n'importe quel environnement qui présenterait des similitudes (cf. partie III.1.3).

### **III.1.1 PRINCIPE DU POSITIONNEMENT PAR SATELLITES ET CHOIX**

L'objectif principal de cette application ponctuelle est de détecter des mouvements potentiels qui affecteraient le massif de la Cristallère à partir d'un réseau de points cibles. La mesure de la position absolue de ces derniers au travers de plusieurs campagnes permettra de définir une éventuelle évolution altimétrique et planimétrique. Dans le cas de déplacements avérés au niveau de ces points cibles, il sera possible par interpolation de décrire les mouvements d'ensemble.

#### **III.1.1.1 Description du système GNSS et choix des constellations**

Il existe différents types de satellites : les satellites d'observation, les satellites de positionnement et les satellites de télécommunication, ces derniers pouvant être classés par altitude ascendante de l'orbite basse à l'orbite géostationnaire.

L'application GNSS (Global Navigation Satellite Systems) n'utilise que les satellites de positionnement qui sont répartis en 4 entités : le système américain GPS, le système russe GLONASS, le système chinois BEIDOU et le système européen GALILEO. Chacun de ces systèmes GNSS est composé de trois segments : i) un segment spatial constitué d'un ensemble de satellites qui forment une constellation, ii) un segment de contrôle au sol et iii) un segment utilisateur (cf. Figure III.1).

Dans le cadre de cette étude, nous n'utiliserons qu'une partie des satellites de positionnement : ceux des constellations américaine GPS et russe GLONASS. Le système

européen GALILEO n'a pu être retenu, car non opérationnel au démarrage de l'étude. Le système chinois BEIDOU n'a également pas été retenu, car la disponibilité de ces satellites au niveau du massif de la Cristallère ne permet pas d'assurer une qualité de données suffisantes.

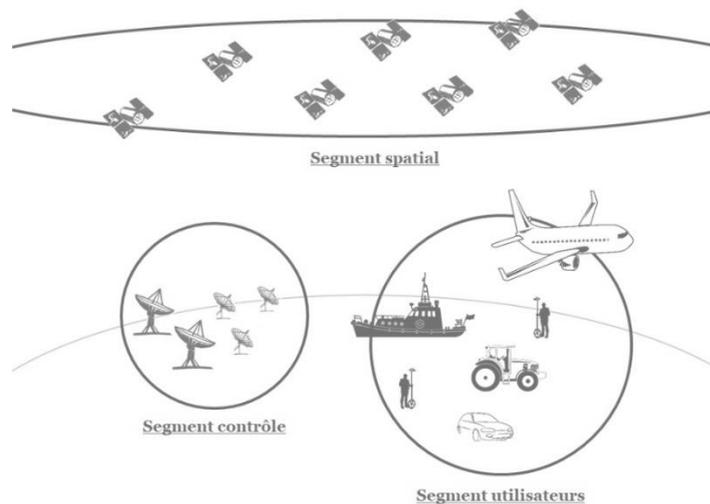


Figure III.1. Description schématique d'un système « Global Navigation Satellite Systems » (GNSS).

### a) Le système GPS

Le système GPS (« Global Positioning System ») aussi appelé NAVSTAR (« NAVigation System by Timing And Ranging ») est un système de positionnement par satellites conçu, mis en service et maintenu par le ministère de la Défense des États-Unis. Le développement du système GPS a commencé dans les années 1970 avec le premier satellite lancé en 1978. Ce système a été déclaré pleinement opérationnel le 27 avril 1995.

Il est composé de 24 satellites (pour les principaux) situés à une altitude approximative de 20 000 km, répartis sur 6 plans orbitaux présentant une inclinaison d'environ 55° sur l'équateur. Les orbites sont quasiment circulaires avec une période d'environ 12 heures. Les satellites sont répartis de façon à assurer en tout lieu une visibilité simultanée de 4 à 8 satellites communiquant avec les utilisateurs.

Sans complications d'ordre physique (cf. Gili et al., 2000 & Capderou, 2012), le principe de fonctionnement d'un satellite correspond à l'émission d'un signal continu de deux ondes (L1 et L2) de fréquences respectives 1575,42 MHz et 1227,60 MHz. Au sol le récepteur capte ce

signal et calcule le temps que celui-ci a mis pour l'atteindre. Il en déduit ainsi la distance qui le sépare du satellite émetteur. Par recoupement avec les autres satellites visibles, le récepteur peut ainsi calculer sa position exacte sur Terre.

### b) Le système GLONASS

Le système GLONASS (acronyme russe) est né durant la guerre froide pour concurrencer le système GPS américain. Ce système a été lancé à partir de 1995. Cependant, la chute de l'URSS a entraîné une obsolescence prématurée du système. Le lancement de nouveaux satellites a permis de déclarer le système pleinement opérationnel seulement à partir de 2011.

De fonctionnement similaire au système GPS, le système GLONASS est également composé de 24 satellites (pour les principaux), mais ils sont uniquement répartis sur 3 plans orbitaux et situés à une altitude approximative de 19 100 km.

#### III.1.1.2 Les différents principes de positionnement

Il existe deux principes de positionnement, l'absolu et le différentiel (cf. Figure III.2).

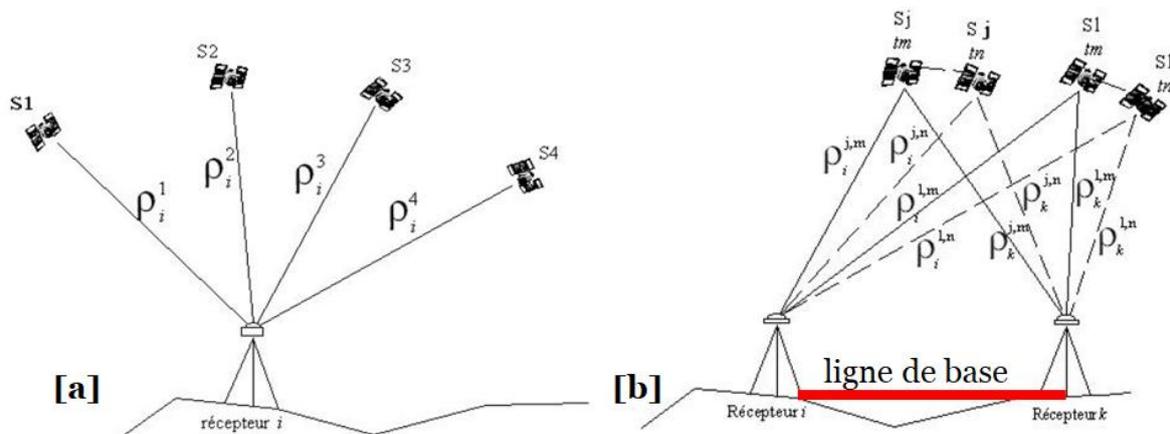


Figure III.2. Schémas de principes du positionnement absolu [a] et différentiel [b] (Duquenne et al., 2005 ; modifié).

Le positionnement absolu permet de mesurer la position d'un récepteur en temps réel à partir de la mesure de la distance récepteur-satellite sur 4 satellites minimum (cf. Figure III.2). Ce mode de positionnement est peu précis (quelques mètres) car il ne considère pas les

multiples biais de mesures (mauvaise trajectoire des satellites, non-synchronisation des horloges atomiques, etc.). Ce mode est principalement utilisé pour la navigation et compte tenu des remarques précédentes, il ne sera donc pas utilisé dans le cadre de ce travail.

Pour le positionnement différentiel (ou relatif), un minimum de deux récepteurs est nécessaire (cf. Figure III.2). Le calcul des distances récepteurs-satellites permet de définir le vecteur entre les deux récepteurs ; ce vecteur est appelé ligne de base. La connaissance de la position exacte d'un des deux points permet de connaître après traitement la position absolue de l'autre. Cette méthode permet de corriger tous les biais de mesure et ainsi d'obtenir une précision de l'ordre du centimètre. Retenons que plus la ligne de base est courte, meilleure sera la précision. L'utilisation de plusieurs lignes de bases améliore considérablement la fiabilité de la mesure.

### **III.1.1.3 Choix des récepteurs terrestres**

Compte tenu des commentaires précédents, nous utiliserons dans le cadre de ce travail le positionnement différentiel qui nécessite au minimum deux récepteurs : un récepteur mobile et un récepteur base. Les caractéristiques de ces derniers sont exposées ci-après.

#### **a) Récepteur 1 : mobile**

L'appareillage utilisé pour l'acquisition des multiples points cibles du massif de la Cristallère est le récepteur bifréquence de la marque Trimble Geo7X associé à une antenne GNSS bifréquence L1/L2 Zephyr 2 montée sur une canne de 2 mètres. Lors de la prise des mesures, cette association antenne-récepteur était correctement stabilisée à l'aide d'un trépied et de la bulle précise de la canne permettant une parfaite verticalité. L'usure de la canne, pouvant engendrer des variations de hauteur, est également gérée grâce à une pointe en tungstène à la base de la canne. Les modalités d'acquisition des mesures sont détaillées dans le volet dédié à cet effet.

#### **b) Récepteur 2 : base**

##### Réseau Géodésique Permanent (RGP) français

La France est équipée d'un système de réseau de base mis en place et entretenu principalement par l'IGN : le Réseau Géodésique Permanent (RGP). Les données sont disponibles gratuitement sur le site <http://rgp.ign.fr/> (dernière consultation en mars 2017). Ce réseau mesure en permanence les distances satellitaires permettant de définir chacune des positions des bases qui le composent. Le réseau est régulièrement alimenté de nouvelles

stations : il était composé de 17 stations en 2000 pour 451 stations en 2016. Ces dernières sont réparties sur l'intégralité du territoire français, mais pas de manière homogène (cf. Figure III.3).

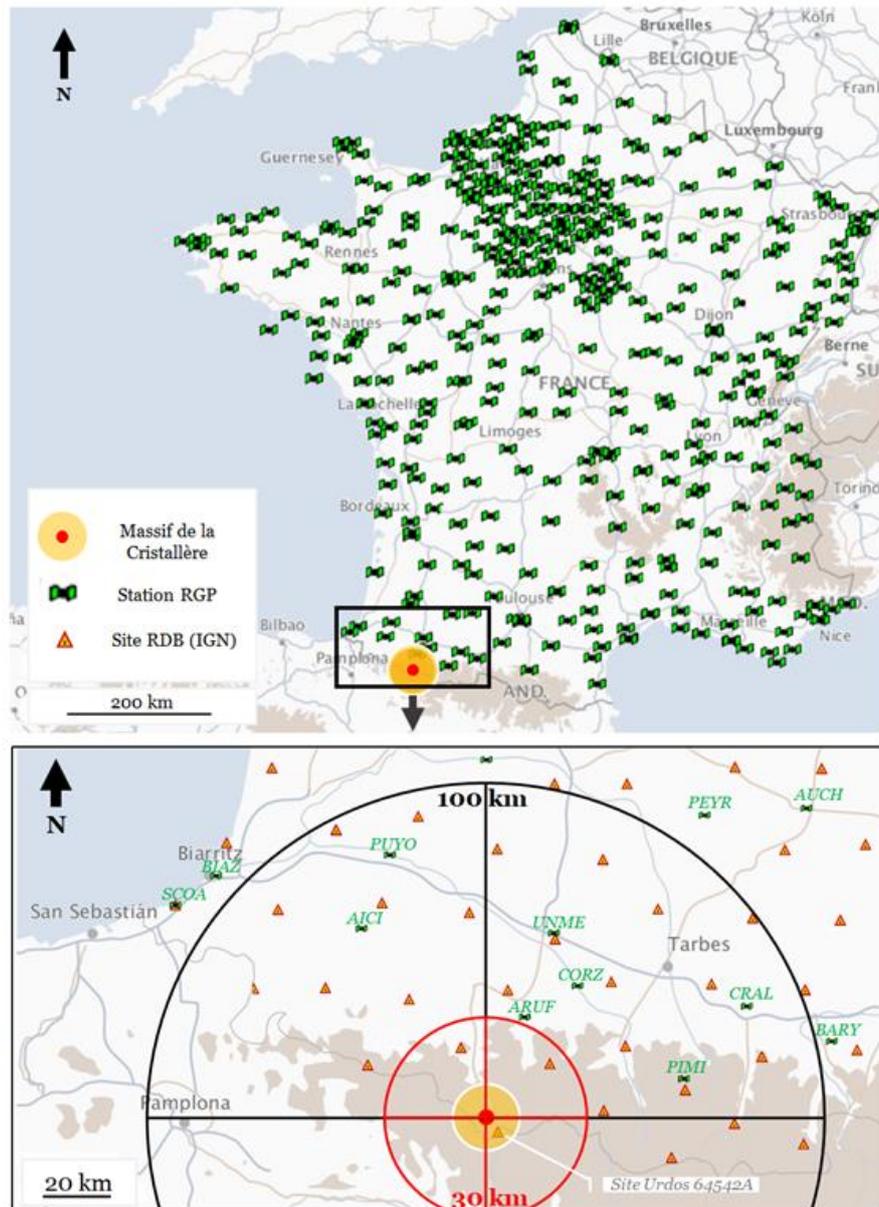


Figure III.3. État du réseau RGP pendant l'étude (période 2014-2016). Positions des stations RGP et des sites géodésiques RDB de l'IGN dans les environs du massif de la Cristallère. Les données sont disponibles gratuitement sur le site <http://rqp.ign.fr/> (dernière consultation en mars 2017).

Aucune station RGP n'est présente dans un rayon inférieur à 30 km du massif de la Cristallère. Seules 7 stations RGP multiconstellations (GPS et GLONASS) sont présentes dans un rayon compris entre 30 et 100 km du massif de la Cristallère, soit de la plus proche à la plus éloignée : ARUF, CORZ, UNME, PIMI, AICI, PUYO, CRAL (cf. Figure III.3).

Les temps d'observation recommandés avec un récepteur bifréquence en mobile pour assurer une bonne fiabilité de la mesure sont liés à la longueur de la ligne de base d'après Duquenne et al. (2005) (cf. Tableau III.1). Retenons que plus la ligne de base est courte, meilleure sera la précision et moindre sera le temps d'observation. De ce fait, nous avons choisi d'éliminer les stations de PUYO et CRAL qui se situent à plus de 80 km du massif de la Cristallère (cf. Figure III.3).

Tableau III.1. Précision du positionnement par satellites statique géodésique en fonction de la longueur des lignes de bases pour deux récepteurs bifréquences (Duquenne et al., 2005).

<i>Longueur des lignes de base</i>	<i>Temps d'observation recommandé</i>	<i>Type de logiciel</i>	<i>Type d'orbites</i>
<i>0-30 km</i>	15 min + 1 min/km + 1 min/100 de dénivelée	Commercial	Radiodiffusées
<i>30-100 km</i>	15 min + 2 min/km + 1 min/100 de dénivelée	Commercial	Radiodiffusées
<i>Supérieure à 100 km</i>	De plusieurs heures à des observations en continue sur des réseaux permanents	Scientifique	Précises (IGS)

Les caractéristiques des 5 stations retenues sont présentées dans le tableau ci-dessous (cf. Tableau III.2). La date de mise en service correspond à l'intégration de ces stations dans le réseau RGP et donc de la diffusion des données ; elle ne correspond pas à la date d'installation du matériel qui est généralement réalisée quelques mois auparavant.

Tableau III.2. Caractéristiques principales des stations RGP dans un rayon de 100 km du massif de la Cristallère.

<i>Acronyme</i>	<i>Lieu</i>	<i>Réseau</i>	<i>Mise en service</i>	<i>Distance (km)</i>
<i>ARUF</i>	Arudy	RENAG	17/05/2014	33
<i>CORZ</i>	Coarraze	SAT-INFO	22/02/2012	48
<i>UNME</i>	Pau	TERIA	28/06/2007	59
<i>PIMI</i>	Bareges La Mongie	RENAG	05/01/2011	60
<i>AICI</i>	Aicirits	SAT-INFO	18/02/2011	67

Pour les stations retenues, nous avons relevé les incidents suivants entre janvier 2013 et décembre 2016 : la station ARUF a été en panne entre le 28/09/2015 et le 13/10/2015 et la station AICI a subi un changement de coordonnées le 07/07/2015. Utiliser plusieurs stations permet d'éviter ce genre d'aléa.

#### Pivot (base temporaire privée)

Compte tenu des temps d'observation recommandés présentés ci-avant (cf. Tableau III.1) et de la position des bases RGP disponibles, il a été nécessaire de constituer un réseau propre au massif de la Cristallère.

La création de ce réseau permet de limiter la longueur des lignes de bases et ainsi diminuer le temps d'acquisition des mesures sur le terrain. Les caractéristiques de la constitution du réseau sont définies ci-après.

L'appareillage utilisé en tant que pivot (base temporaire privée) est le récepteur bifréquence de la marque Trimble GeoXH6000 associé à une antenne GNSS bifréquence L1/L2 Tornado montée sur une canne de 2 mètres à bulle précise avec une pointe de tungstène, toujours stabilisée à l'aide d'un trépied.

### **III.1.2 DISPOSITION DE L'ENSEMBLE DES POINTS CIBLES SUR LE MASSIF DE LA CRISTALLERE**

Le réseau propre au massif de la Cristallère est organisé sur deux niveaux. Initialement, nous avons implanté sur le massif de la Cristallère en 2014 un peu plus de 200 points cibles permanents concentrés dans différents réseaux : RB, RD1, RD2, RNR1, RNR2, RNR3 et RNR4 (cf. Figure III.4). Cependant, nous n'avons retenu pour l'étude qu'une cinquantaine d'entre eux dans la mesure où il nous était compliqué d'assurer le suivi de tous ces points dans le temps imparti pour cette étude. Nous n'avons ainsi pas retenu les réseaux RNR1 à RNR4 (Réseau Non Retenu ; cf. Figure III.4).

In fine, le réseau retenu dans le cadre de cette étude est constitué des éléments suivants :

- i) Le premier niveau appelé réseau de base (points cibles RB) correspond à un ensemble de points défini par rapport à un point de référence PR (cf. partie III.1.2.1). La réalisation de ce réseau permet de créer une ligne de base inférieure à 10 km.

- ii) Le second niveau est constitué de deux réseaux dits de détail (RD1 et RD2), systématiquement rattachés au point de base le plus proche (un point cible RB), toujours dans l'optique de réduire la ligne de base à cette fois-ci une distance inférieure à 1 km.

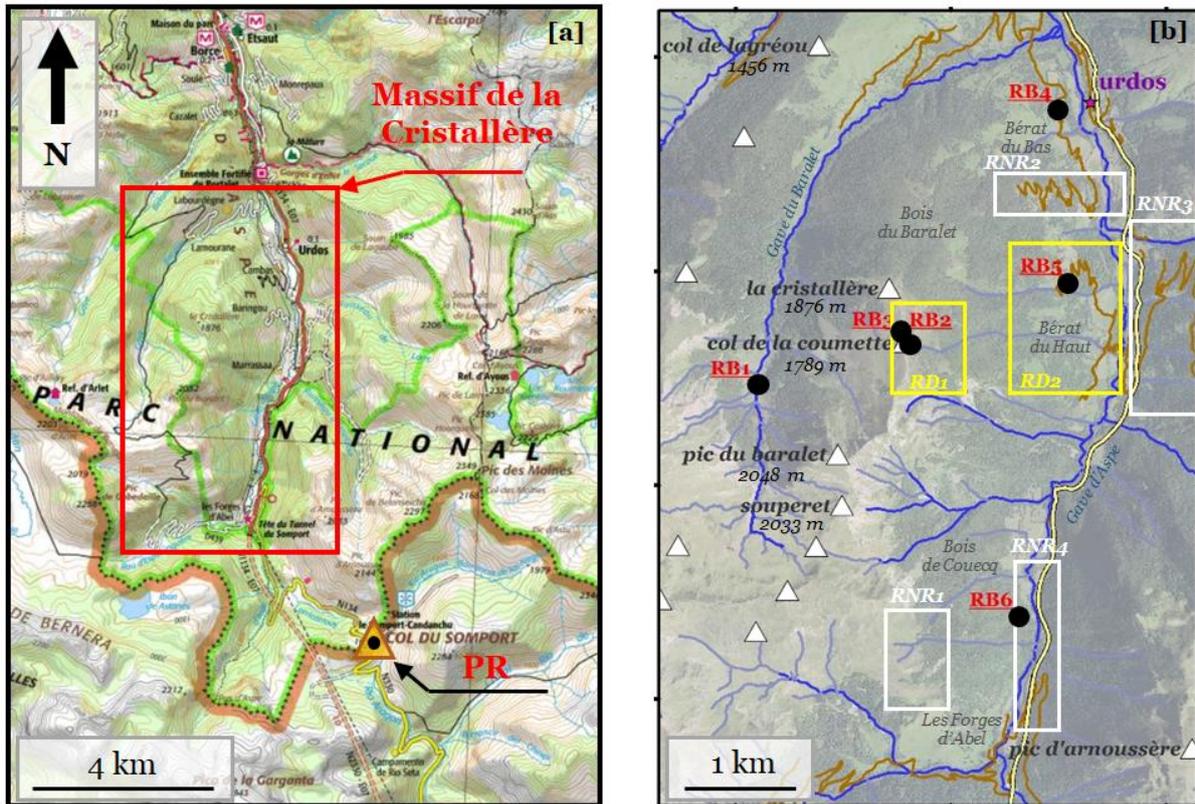


Figure III.4. Situation du point de référence PR, des 6 points cibles RB du réseau de base et des 2 réseaux de détails retenus (RD1 et RD2) du massif de la Cristallère pour le positionnement par satellites DGNSS (constellations GPS & GLONASS). Les réseaux non retenus pour l'étude sont aussi indiqués : RNR1, RNR2, RNR3 et RNR4. Fond ortho-image 2012 de l'IGN récupérée sur <http://professionnels.ign.fr/> en mars 2016.

### III.1.2.1 Localisation et rôle du point de référence PR

Le point PR a servi de base pour la mesure mobile des points cibles RB. Le point choisi est un point connu du Réseau Géodésique Français (RGF) de l'IGN. Précisons que ce dernier est composé des trois réseaux suivants :

- i) Le Réseau de Référence Français (RRF) composé de 23 points déterminés par géodésie spatiale (espacement de 200 km et exactitude centimétrique) ;
- ii) Le Réseau de Base Français (RBF) composé de 1009 sites déterminés par GPS (espacement de 25 km et exactitude centimétrique ; cf. Figure III.3) ;
- iii) Le Réseau de Détail Français (RDF) composé d'environ 80000 points avec une précision généralement insuffisante pour une application comme celle-ci (espacement de 3 km et exactitude infra décimétrique).

Dans la mesure où nous n'avons pas de points du réseau RRF de l'IGN à proximité du massif de la Cristallère, nous avons opté pour le site géodésique du RBF de l'IGN le plus proche : il s'agit du site Urdos n°64542A (cf. Figure III.3). Ainsi, le point de référence PR ne se trouve pas sur le massif de la Cristallère, mais à environ 4 km au sud de celui-ci. Il se trouve plus précisément au col du Somport, au niveau de la frontière franco-espagnole (cf. Figure III.4).

Ce site géodésique qui a la particularité d'être bien dégagé est composé de 3 repères hémisphériques en laiton de 18 mm de diamètre mis en place en 1944 avec une précision centimétrique (points A, B et C ; cf. Figure III.5). C'est le point B que nous avons utilisé comme point de référence PR puisque c'est le point cible géographiquement le plus proche du massif de la Cristallère. Il est implanté sur un rocher à quelques mètres un peu plus au nord-ouest de la borne frontière n°305bis et à environ 30 m au sud du centre de déneigement du Somport (cf. Figure III.5). L'accès à ce repère se fait facilement à cet endroit.

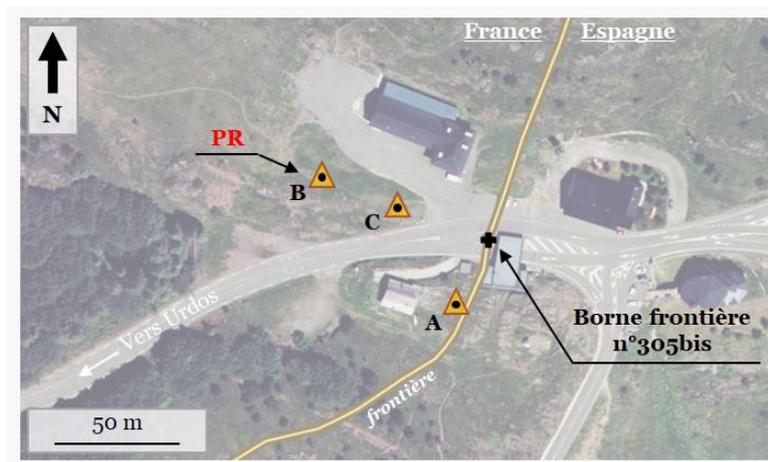


Figure III.5. Localisation du point de référence PR dans le site géodésique Urdos n°64542A du réseau de base de l'IGN au niveau du Col du Somport. Fond ortho-image 2012 de l'IGN récupérée sur <http://professionnels.ign.fr/> en mars 2016.

Nous nous sommes assuré de la stabilité de ce site au théodolite. En effet, si notre point de référence PR s'était avéré instable, toutes nos mesures de positionnement par satellites avec pivot temporaire auraient pu être compromises dans le cadre de cette étude.

### III.1.2.2 Localisation et rôle des points cibles RB du réseau de base

Nous avons réparti les 6 points cibles RB du réseau de base sur l'ensemble du massif de la Cristallère. Ces derniers ont été implantés de manière à surveiller le DSL de la Cristallère dans son ensemble et son environnement. Le point cible RB3 est situé dans la partie sommitale du DSL de la Cristallère sur le versant est du massif et le point cible RB5 au niveau du bourrelet frontal (cf. Figure III.4). Le point cible RB2 se trouve à proximité du point cible RB3, sur le versant ouest du massif, dans une zone non affectée par le DSL (cf. Figure III.4). Le point cible RB1 a été positionné en pied de versant dans l'alignement formé par les points précédents (cf. Figure III.4). Les 2 autres points cibles RB6 et RB4 sont disposés sur le versant est du massif de la Cristallère respectivement dans la zone sud et dans la zone nord (cf. Figure III.4). Précisons que le point cible RB6 se trouve au niveau d'un glissement rocheux complexe à proximité du Tunnel du Peilhou.

Ces points cibles sont matérialisés par des tubes de 2 cm de diamètre scellés dans le sol sur 60 cm dans des zones parfaitement dégagées de tout obstacle pouvant influencer sur la qualité des mesures (cf. Figure III.6). Ils servent également de support pour les cibles photogrammétriques artificielles utilisées pour le drone (cf. partie III.2).

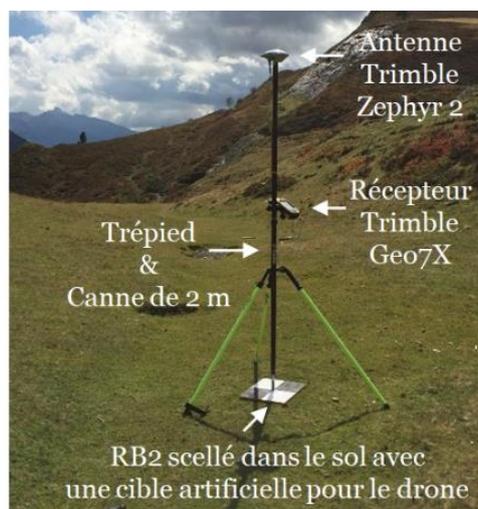


Figure III.6. Photographie commentée du point cible RB2 prise lors de l'acquisition des points cibles du réseau de base du massif de la Cristallère.

### III.1.2.3 Localisation et rôle des points cibles des deux réseaux de détails

Nous avons également mis en place sur le massif de la Cristallère 2 réseaux de détail : l'un en haut du versant étudié (les points cibles RDA du réseau de détail n°1), l'autre en bas (les points cibles RDB du réseau de détail n°2).

#### a) Localisation et rôle des points cibles RDA du réseau de détail n°1

Le premier réseau de détail est composé de 20 clous (points cibles RDA) répartis de part et d'autre de l'accident majeur qui conditionne l'escarpement principal du glissement rocheux de la Cristallère (type DSL) (cf. Figure III.7). Ces derniers sont rattachés au point cible RB3 du réseau de base.

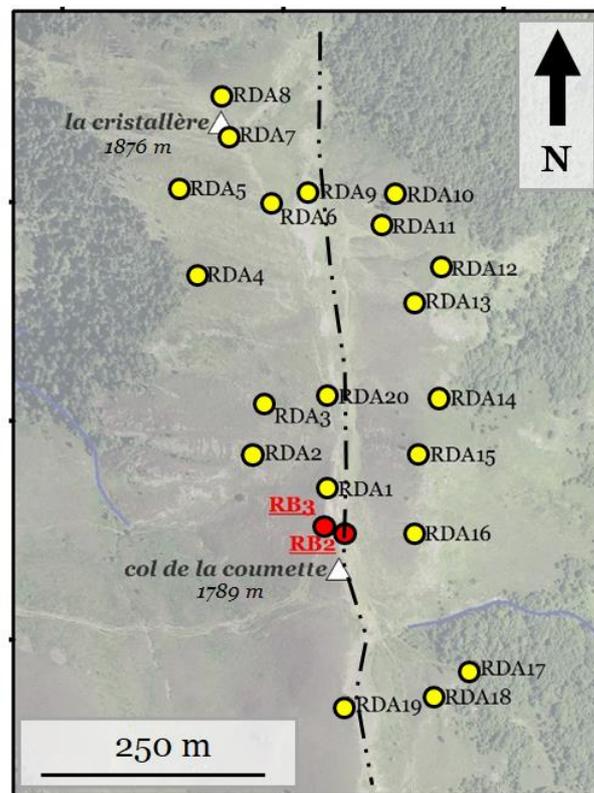


Figure III.7. Localisation des points cibles RDA du réseau de détail n°1 du massif de la Cristallère. Les points cibles (RDA1 à RDA20) sont positionnés de part et d'autre de l'accident majeur représenté en pointillé ici qui conditionne l'escarpement principal du DSL de la Cristallère. Fond ortho-image 2012 de l'IGN récupérée sur <http://professionnels.ign.fr/> en mars 2016.

## b) Localisation et rôle des points cibles RDB du réseau de détail n°2

Le deuxième réseau de détail est quant à lui composé de 22 points cibles (RDB) répartis plus en contrebas dans le versant est. Il comprend 3 tiges scellées dans le sol, 4 clous disposés dans le rocher, 9 clous sur la route qui mène depuis le bas aux granges de Labahut et 6 empreintes sur des ouvrages qui matérialisent le cheminement de la conduite d'eau potable à cet endroit (cf. Figure III.8).

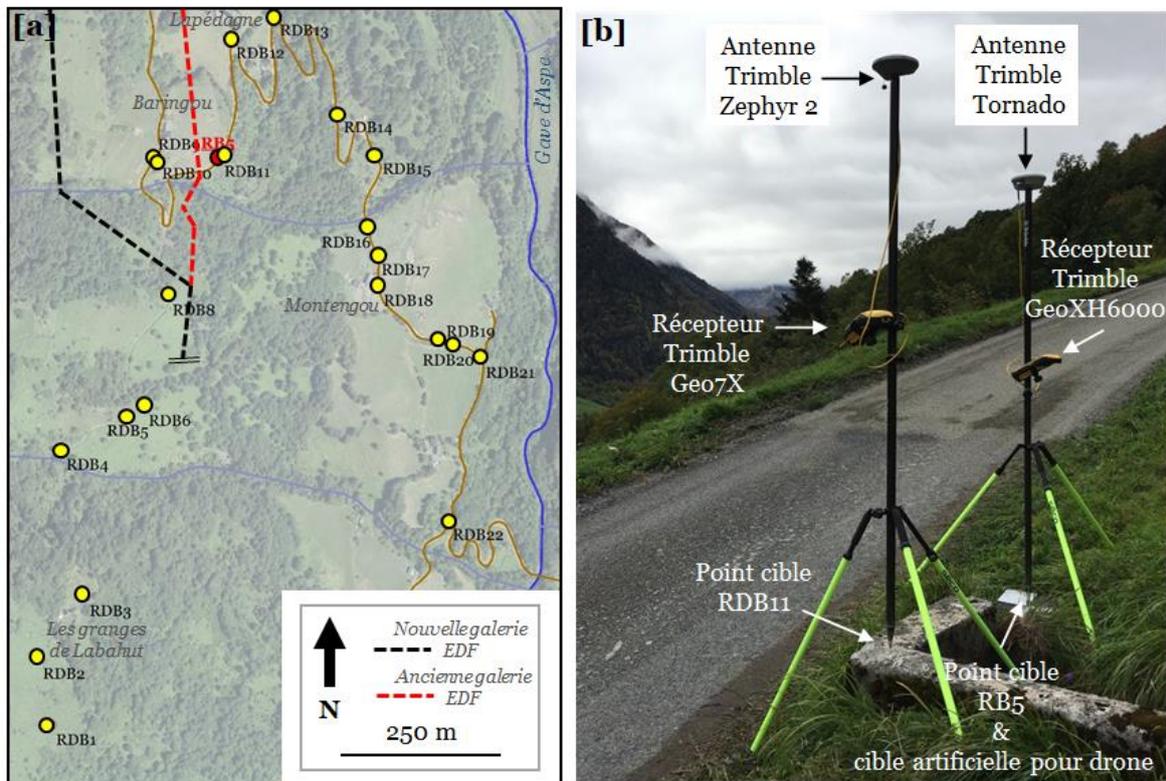


Figure III.8. Localisation des points cibles RDB du réseau de détail n°2 du massif de la Cristallère [a] ; le tracé de la galerie souterraine EDF est volontairement partiel. Fond ortho-image 2012 de l'IGN récupérée sur <http://professionnels.ign.fr/> en mars 2016. Photographie commentée des points cibles RDB11 et RB5 prise lors de l'acquisition des points cibles du réseau de détail n°2 du massif de la Cristallère [b].

Ces points cibles sont positionnés au niveau de la partie centrale du bourrelet frontal du DSL de la Cristallère dans le secteur du Bérat du haut. Il y a deux parties pour ce réseau : une première partie où les points cibles RDB1 à RDB12 sont disposés en haut du bourrelet

frontal (au niveau des granges de Labatut et des fermes Baringou et Lapédagne) et une deuxième partie, RDB13 à RDB22, où les points cibles sont disposés en partie basse du bourrelet frontal (depuis le pont Naudin qui surplombe le gave d'Aspe vers les fermes Baringou et Lapédagne) (cf. Figure III.8). Pour ces points cibles le pivot est positionné sur le réseau de base RB5.

### **III.1.3 ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNÉES TRIDIMENSIONNELLES PONCTUELLES**

Le protocole d'acquisition dans le cadre de cette étude est le suivant :

- Acquisition du point de référence PR,
- Acquisition des 6 points cibles RB du réseau de base,
- Acquisition des points cibles des réseaux de détail.

Le traitement des mesures a été effectué à chaque étape afin de s'assurer du bon déroulement de l'opération.

Notons que chaque campagne peut être compromise si l'une de ces étapes n'est pas réalisée correctement.

Avant chaque acquisition sur le terrain, il est nécessaire de consulter le planning online <http://www.trimble.com/GNSSPlanningOnline/#/Settings> (dernière consultation en juin 2016), qui permet de s'assurer de la disponibilité des satellites et de la configuration géométrique des constellations (GPS & GLONASS) : Le choix de la date d'intervention a été fait en conséquence.

Précisons que pendant l'acquisition des points cibles, ces deux associations récepteurs-antennes GNSS devaient être correctement stabilisées à l'aide de trépieds et une attention toute particulière devait être portée quant à leurs positionnements : le centrage avec le niveau à bulle devait être irréprochable et les antennes étaient systématiquement orientées vers le nord à l'aide d'une boussole avec une précision de  $\pm 5^\circ$ . Ces dispositions certes contraignantes permettent d'assurer des résultats optimaux.

#### **III.1.3.1 Acquisition du point de référence PR**

L'acquisition du point de référence PR a pour objectif de s'assurer de la stabilité de ce point tout au long de l'étude. Elle a été réalisée avant chaque campagne (avant acquisition des

points cibles RB du réseau de base) et à la fin de chaque campagne (après acquisition des points cibles RDA et RDB des réseaux de détails).

Pour relever le point de référence PR, nous avons utilisé le récepteur bifréquence Geo7X associé à l'antenne GNSS L1/L2 Zephyr 2. Pendant 210 minutes soit 3,5 heures par relevé, nous avons enregistré en continu les signaux des différents satellites des constellations GPS et GLONASS. La durée d'échantillonnage a été fixée d'après la distance de la station RGP la plus éloignée à savoir AICI. Avec un échantillonnage d'une position à chaque seconde, nous avons eu à exploiter exactement 12600 positions par relevé, à l'issue de l'acquisition.

### **III.1.3.2 Acquisition des points cibles RB du réseau de base**

Nous avons relevé les points cibles RB du réseau de base après la mesure initiale du point de référence PR et avant l'acquisition des points cibles des deux réseaux de détails.

Le récepteur bifréquence GeoXH6000 associé à l'antenne GNSS L1/L2 Tornado devait être placé en pivot temporaire sur le point de référence PR pour enregistrer en continu les signaux des différents satellites des constellations GPS et GLONASS (cf. Figure III.9).

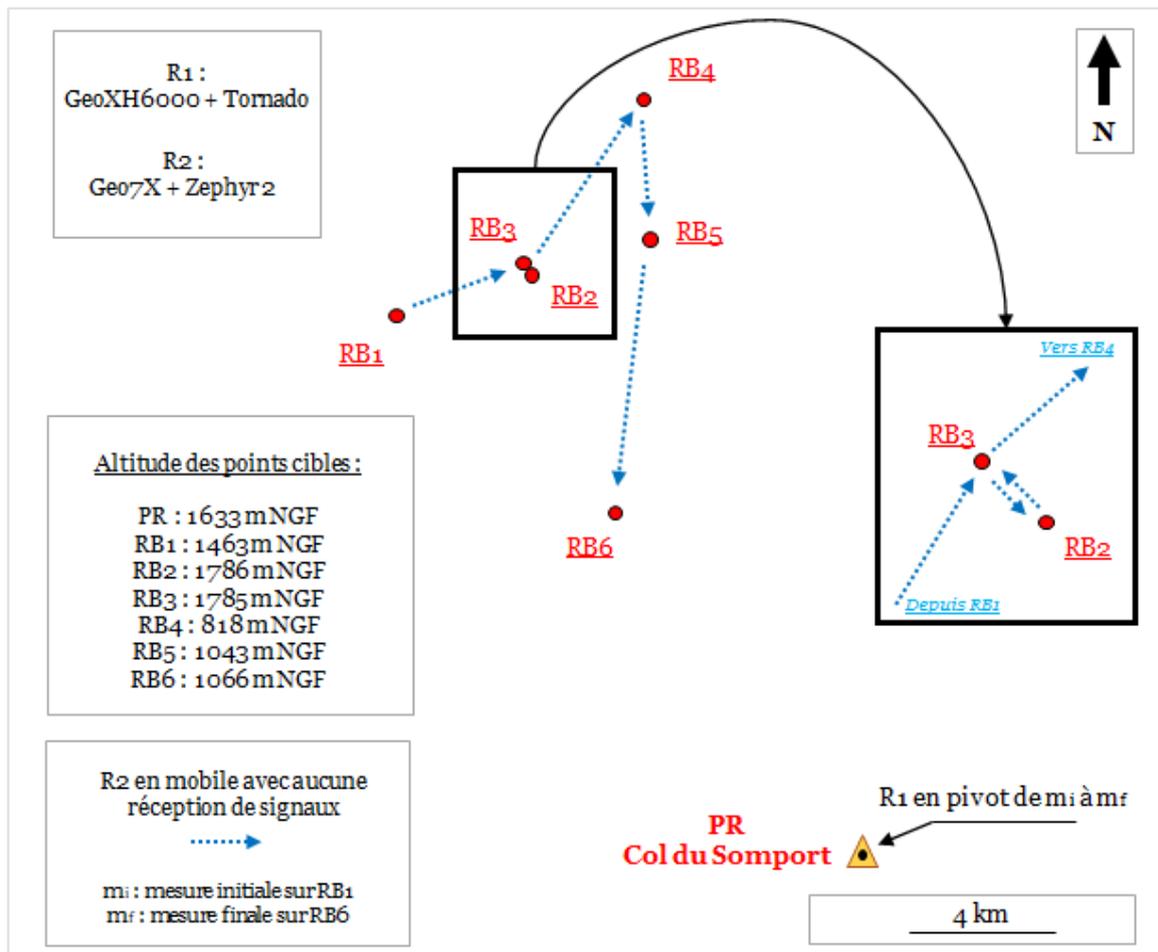
Le récepteur bifréquence Geo7X associé à l'antenne GNSS L1/L2 Zephyr 2 était quant à lui mobilisé de la même manière sur les 6 points du réseau de base : chaque point cible devait respecter le temps indiqué lié à l'éloignement du pivot PR. Nous avons enregistré le point cible RB1 pendant 45 min, RB2 et RB3 pendant 30 min et RB4, RB5 et RB6 pendant 35 min. Le protocole complet est illustré ci-après : Figure III.9. Différentes vérifications ont été réalisées : i) la répétabilité des mesures réalisées à temps réduit et ii) la vérification de l'absence de dérive sur le point cible RB3 (cf. Figure III.9).

### **III.1.3.3 Acquisition des points cibles des réseaux de détails**

Les points des réseaux de détails doivent être relevés après l'acquisition des 6 points cibles RB du réseau de base.

Le récepteur bifréquence GeoXH6000 associé à l'antenne GNSS L1/L2 Tornado devait être placé en pivot temporaire sur l'un des points du réseau de base RB pour enregistrer en continu les signaux des différents satellites des constellations GPS et GLONASS. Les points cibles RB3 et RB5 ont été respectivement choisis comme pivot pour les réseaux de détails RDA et RDB (exemple pour les points cibles RDA ; cf. Figure III.10). Ces points sont considérés comme immuables pour une même campagne.

Le récepteur bifrédence Geo7X associé à l'antenne GNSS L1/L2 Zéphyr 2 était utilisé sur les points cibles des réseaux de détails RDA et RDB.



R1 sur PR : [START]

R2 sur RB1 : [START] + 15 min [initialisation] + 30 min [mesure] + 1 min [vérification] + [OFF]

R2 sur RB3 : [START] + 15 min [initialisation] + 15 min [mesure] + 1 min [vérification] + [OFF]

R2 sur RB2 : [START] + 15 min [initialisation] + 15 min [mesure] + 1 min [vérification] + [OFF]

R2 sur RB3 : [START] + 15 min [initialisation] + 15 min [mesure] + 1 min [vérification] + [OFF]

-> vérifier si dérive

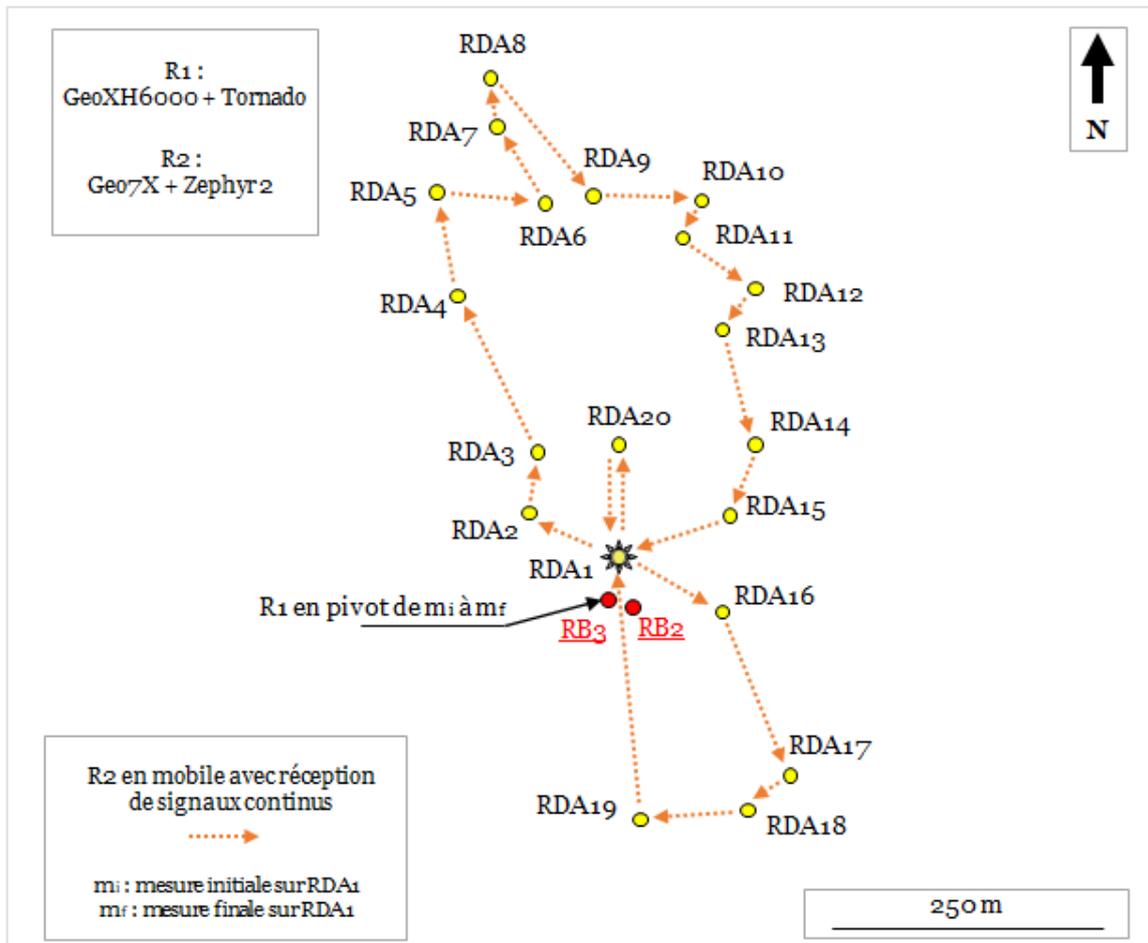
R2 sur RB4 : [START] + 15 min [initialisation] + 20 min [mesure] + 1 min [vérification] + [OFF]

R2 sur RB5 : [START] + 15 min [initialisation] + 20 min [mesure] + 1 min [vérification] + [OFF]

R2 sur RB6 : [START] + 15 min [initialisation] + 20 min [mesure] + 1 min [vérification] + [OFF]

R1 sur PR : [OFF]

Figure III.9. Schéma d'observation pour l'acquisition des points cibles RB du réseau de base du massif de la Cristallère en mode statique géodésique avec le pivot PR (point de référence au col du Somport). Commentaires dans le texte.



R1 sur RB3 : [START]  
 R2 sur RDA1 : [START] + 15 min [initialisation] + 2 min [mesure] + 1 min [vérification]  
 R2 sur RDA2 : 2 min [mesure] + 1 min [vérification]  
 (...)  
 R2 sur RDA15 : 2 min [mesure] + 1 min [vérification]  
 R2 sur RDA1 : 2 min [mesure] + 1 min [vérification] -> vérifier si dérive  
 R2 sur RDA16 : 2 min [mesure] + 1 min [vérification]  
 (...)  
 R2 sur RDA19 : 2 min [mesure] + 1 min [vérification]  
 R2 sur RDA1 : 2 min [mesure] + 1 min [vérification] -> vérifier si dérive  
 R2 sur RDA20 : 2 min [mesure] + 1 min [vérification]  
 R2 sur RDA1 : 2 min [mesure] + 1 min [vérification] + [OFF] -> vérifier si dérive  
 R1 sur RB3 : [OFF]

Si perte de signaux avec R1  
 ▼  
 refaire initialisation sur RDA1 avec R1

*Figure III.10. Schéma d'observation pour l'acquisition des points cibles RDA du réseau de détail n°1 du massif de la Cristallère en mode statique rapide avec le pivot RB3 du réseau de base. Commentaires dans le texte.*

Après le respect d'un temps d'initialisation de 15 min sur le premier point cible, les mesures ont été réalisées sur une période de 120 secondes (acquisition) plus 60 secondes de vérifications (répétabilité). Avec un échantillonnage prévu d'une position toutes les secondes, nous devons avoir exactement 120 positions par points cibles à exploiter à l'issue de l'acquisition (cf. Figure III.10).

Dans la mesure où l'initialisation n'est faite que sur un point nous devons : i) continuellement nous assurer de ne pas perdre le signal et ii) vérifier régulièrement l'absence de dérive en reprenant le point d'initialisation. Après traitement, dans le cadre d'apparition d'une dérive cette dernière a été corrigée en fonction du temps.

Dans le cas d'une perte des signaux satellites, l'initialisation doit être réitérée sur le point d'initialisation avant de reprendre la procédure au point d'arrêt (cf. Figure III.10).

#### **III.1.3.4 Traitement des données (« Post-traitement » : correction différentielle)**

Le traitement a été réalisé avec le logiciel fourni par le constructeur Trimble : GPS Pathfinder Office.

Les satellites dont la position est trop basse par rapport à l'horizon peuvent présenter un signal altéré suite à la présence d'obstacles. Les trajectoires des ondes peuvent ne pas être directes (« trajets multiples »). Le logiciel Trimble permet de ne pas prendre en compte ces dernières dans le calcul. Cette option a systématiquement été choisie afin de ne pas altérer la qualité des données.

Le résultat donné par le calcul après post-traitement est la moyenne des positions de l'échantillon. L'intervalle de confiance retenue pour annoncer la précision des mesures est choisi à 95%. Notons que les composantes est et nord des coordonnées tridimensionnelles sont exprimées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 et l'altitude en mètres NGF-IGN69 (RAF09).

Afin de justifier l'utilisation du pivot pour le massif de la Cristallère, le traitement des données a été réalisé selon deux modèles : 1) traitement avec les bases du RGP et 2) traitement

avec uniquement le pivot. Le logiciel Trimble ne permet pas de réaliser le traitement en utilisant simultanément les bases du RGP et le pivot.

La comparaison de ces deux modèles permettra de valider l'utilisation du pivot tant pour le réseau de base que pour les réseaux de détails :

- i) Modèle n°1 (résultats avec stations RGP) versus modèle n°2 (résultats avec pivot PR) pour le réseau de base ;
- ii) Modèle n°1A (résultats avec stations RGP) versus modèle n°2A (résultats avec pivot RB3-PR) pour le réseau de détail n°1 ;
- iii) Modèle n°1B (résultats avec stations RGP) versus modèle n°2B (résultats avec pivot RB5-PR) pour le réseau de détail n°2.

### III.1.4 SYNTHÈSE DU DÉROULEMENT DES MESURES

Le calendrier de l'ensemble des mesures effectuées sur le massif de la Cristallère est présenté dans tableau ci-après.

Tableau III.3. Chronologie de l'ensemble des mesures de positionnement DGNSS effectuées sur le massif de la Cristallère avec les constellations GPS & GLONASS.

<i>Date</i>	<i>Réseau concerné</i>	<i>Point(s) cible(s) mesuré(s)</i>	<i>Bases et/ou pivot pour différentiel</i>
30/10/2014	Réseau de détail n°1	Points RDA1 à RDA20	Stations RGP
09/01/2015	Réseau de détail n°2 (partie 1)	Points RDB1 à RDB12	Stations RGP
30/09/2015	Point de référence	Point PR	Stations RGP
01/10/2015	Réseau de base	Points RB1 à RB6	(1) Stations RGP & (2) Pivot PR
08/10/2015	Réseau de détail n°2 (partie 2)	Points RDB9 à RDB22	(1) Stations RGP & (2) Pivot RB5-PR
09/10/2015	Point de référence	Point PR	Stations RGP
10/05/2016	Point de référence	Point PR	Stations RGP
16/05/2016	Réseau de base	Points RB1 à RB6	Stations RGP
17/05/2016	Réseau de détail n°1	Points RDA1 à RDA8, RDA10 à RDA13 et RDA15	(1) Stations RGP & (2) Pivot RB3-PR
20/05/2016	Réseau de détail n°2 (partie 1)	Points RDB1 à RDB6 et RDB8 à RDB12	(1) Stations RGP & (2) Pivot RB5-PR
20/05/2016	Réseau de détail n°2 (partie 2)	Points RDB9 à RDB22	(1) Stations RGP & (2) Pivot RB5-PR
02/06/2016	Point de référence	Point PR	Stations RGP
03/06/2016	Réseau de base	Points RB1 à RB6	Stations RGP

07/06/2016	Réseau de détail n°1	Points RDA1 à RDA20	(1) Stations RGP & (2) Pivot RB3-PR
09/06/2016	Réseau de détail n°2 (partie 1)	Points RDB1 à RDB8 et RDB10 à RDB12	(1) Stations RGP & (2) Pivot RB5-PR
09/06/2016	Réseau de détail n°2 (partie 2)	Points RDB10 à RDB22	(1) Stations RGP & (2) Pivot RB5-PR
09/06/2016	Point de référence	Point PR	Stations RGP

## **III.2 OUTILS ET METHODES POUR LES OBSERVATIONS AVEC UN DRONE DU TYPE AILE VOLANTE RGB**

Les applications avec un drone sont de plus en plus d'actualité aujourd'hui et largement usitées (Niethammer et al., 2012 ; Hugenholtz et al., 2013 ; Vasuki et al., 2014 ; Bhardwaj et al., 2016 ; Vollgger & Cruden, 2016 ; etc.) ; et ce même pour le territoire français, malgré la réglementation contraignante qui est en vigueur depuis peu (utilisateur avec détention d'un certificat d'aptitude théorique ULM à minima, respect d'un scénario type pour l'acquisition selon le type de drone, etc.). Nous exposerons tout d'abord très brièvement le principe de la photogrammétrie assistée par ordinateur, non pour débattre de nouveau d'une technique déjà bien connue, mais seulement afin de rappeler les notions essentielles utiles pour comprendre la suite de ce travail. Nous soulignerons l'intérêt ici d'utiliser un drone du type aile volante (cf. partie III.2.1). Nous expliquerons enfin les principales composantes de notre méthodologie appliquée sur ce site : puis les différentes étapes pour l'acquisition et le traitement des images (cf. partie III.2.2). Nous présenterons ensuite sous forme de synthèse l'ensemble des observations aériennes réalisées sur le massif de la Cristallère (cf. partie III.2.3).

### **III.2.1 PRINCIPE DE LA PHOTOGRAMMETRIE ASSISTEE PAR ORDINATEUR ET CHOIX**

L'objectif principal de cette application surfacique est de proposer un modèle 3D et une mosaïque d'images du massif de la Cristallère à partir d'images géolocalisées obtenues avec un drone et un traitement assisté par ordinateur.

La photogrammétrie assistée par ordinateur permet de déterminer in fine les dimensions et les volumes d'un objet à partir d'images acquises selon plusieurs points de vue ; le principe est expliqué par exemple dans la thèse de Casson (2004). Nous suggérons aux lecteurs de s'y reporter pour comprendre pleinement cet outil. Attardons nous simplement sur les notions essentielles indispensables pour la compréhension de ce travail, l'objet n'étant pas comme dit précédemment de travailler sur le principe de la photogrammétrie.

#### **III.2.1.1 Notions essentielles**

Le GSD (Ground Sampling Distance ; distance d'échantillonnage au sol) correspond à la distance entre deux centres de pixels consécutifs mesurés au sol. Retenons que plus celui-ci est faible, meilleure est la résolution spatiale de l'image : un GSD de 10 cm/pixel signifie qu'un pixel dans l'image représente 10 cm sur le terrain soit 0,01 m<sup>2</sup>. Ce GSD est lié de manière intrinsèque à la hauteur de vol, au capteur et à la taille de l'image.

Remarquons que le relief marqué du massif de la Cristallère, ne permet pas d'assurer un même GSD pour chaque image bien que toutes les dispositions soient prises pour l'éviter : lignes de vol perpendiculaires à la pente, différence de hauteur entre le drone et le terrain maintenue, chevauchement entre les vols. Nous obtenons donc un GSD moyen de vol malgré une hauteur de vol constante.

Ainsi, pour un GSD de 10 cm/pixel, la précision relative des données est de l'ordre de 10 à 20 cm pour les composantes horizontales (X, Y) et 20 à 30 cm pour la composante verticale (altitude Z) du modèle tridimensionnel. La précision relative des données est de l'ordre de 1 à 2 fois le GSD pour X et Y et de 2 à 3 fois le GSD pour Z (SenseFly, 2014).

Pour augmenter la précision absolue du projet, des points de contrôle au sol (GCP) sont nécessaires ; il ne sont en revanche pas nécessaires pour le traitement d'un projet qui nécessite l'utilisation d'au moins 3 points d'accroches pour un vol.

Retenons que la résolution de la mosaïque d'images et du modèle numérique de surface (MNS ou Modèle Numérique de Terrain si absence de couvert végétal) correspond à minima au GSD du projet.

### **III.2.1.2 Choix du type de drone : l'eBee**

Nous avons opté pour un drone du type aile volante : l'eBee de senseFly (cf. Figure III.11). La littérature scientifique au début de notre étude en faisait certes moins son éloge puisque les pluricoptères captaient essentiellement toute l'attention dans le milieu scientifique et industriel (cf. Niethammer et al., 2012 ; Vasuki et al., 2014 ; etc.). Mais les avantages annoncés par les différents constructeurs que nous avons sollicités et certaines études comme celle de Hugenholtz et al. (2013), permettaient de confirmer notre position : il est plus autonome, plus endurant et plus stable en admettant que les conditions météorologiques capricieuses de la montagne pussent être de la partie.

L'eBee est conçu pour avoir une endurance maximale en vol de 50 min, une vitesse de croisière nominale de 40-90 km/h (11-25 m/s) pouvant couvrir jusqu'à 12 km<sup>2</sup> de terrain pour un seul vol (SenseFly, 2014). Nous avons constaté cependant lors de nos observations aériennes sur le massif de la Cristallère que ces performances opérationnelles varient bien évidemment selon les conditions extérieures (l'intensité du vent notamment), soit entre 20 et 40 min. Elles varient également en fonction de l'usure de la batterie au lithium, nécessaire pour la performance et l'endurance, mais qui présente un défaut assez récurrent d'une fin de vie assez prématurée.

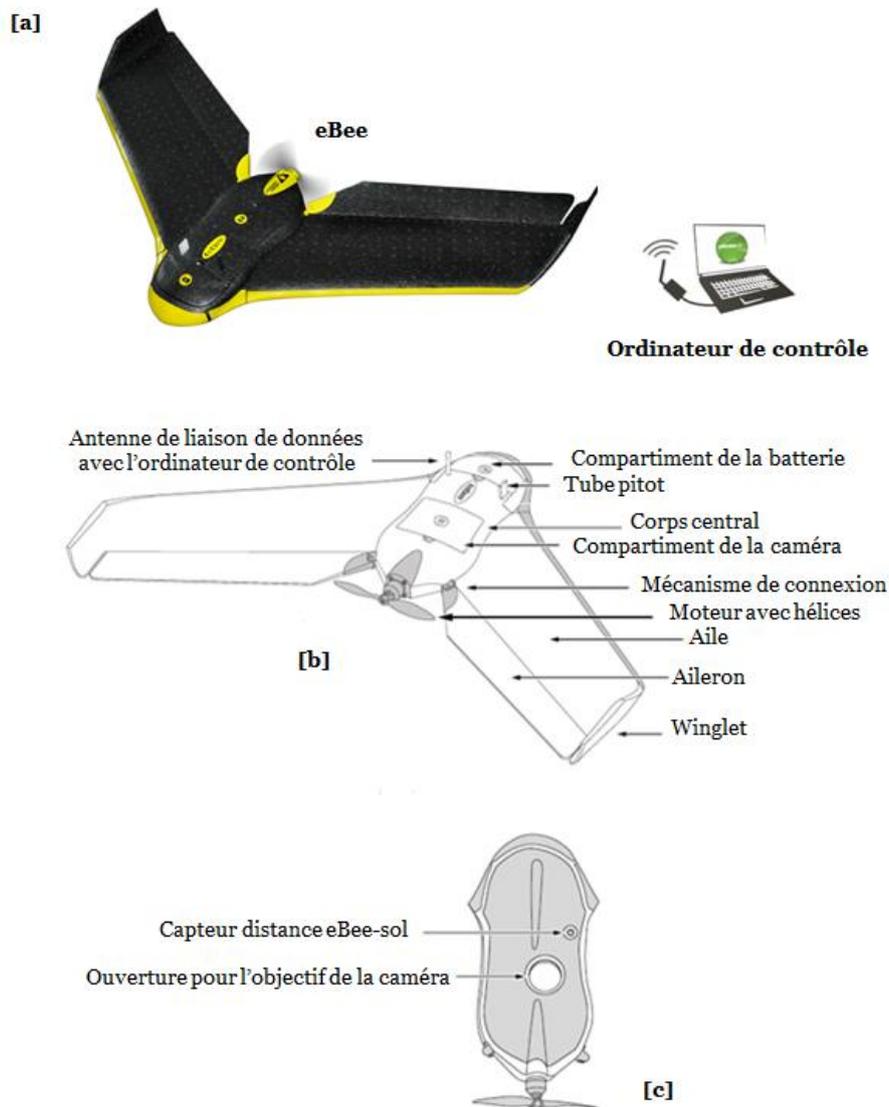


Figure III.11. L'eBee de senseFly [a] avec représentation de sa face supérieure[b] et de sa face inférieure [c] (SenseFly, 2014).

Notons que l'utilisation de l'eBee est proscrite la nuit, s'il pleut, si le vent excède une vitesse de 12 m/s (limite de résistance jusqu'à 45 km/h) et si la température est supérieure à 35°C.

D'une masse approximative au décollage de 0,69 kg grâce à sa matière composite (mousse et structure carbonique), l'eBee présente une envergure de 96 cm. Les différents

composants de l'ebee sont illustrés ci-avant (cf. Figure III.11). Nous l'avons équipé d'un objectif « Canon PowerShot ELPH 110 HS 16,1 MP (signature spectrale Rouge Vert Bleu) ».

### **III.2.2 ACQUISITION ET TRAITEMENT DES IMAGES**

Nous expliquons succinctement les différentes étapes pour l'acquisition et le traitement des images afin d'obtenir une représentation 3D du massif de la Cristallère.

Chaque plan de vol est préalablement pensé avec le logiciel eMotion2 du constructeur senseFly ; ce même logiciel sert également d'outil de commande sur le terrain pour l'acquisition des données (trajectoire réelle du vol réalisé et images géolocalisées notamment).

Préalablement, des cibles photogrammétriques ont été matérialisées par des damiers noir et blanc de 0,40 par 0,30 m autour de chaque point cible RB du réseau de base DGNS en 2015 (cf. partie III.1) ; celles-ci devant être remplacées si elles s'avéraient défectueuses (dégradations physiques, couleurs estompées, etc.).

Le bon déroulement d'un vol peut être suivi sur l'interface du logiciel sur l'ordinateur de contrôle. Les informations (vitesse de vent, nombre d'images, position du drone, respect du chevauchement des lignes de vols, etc.) sont transmises via un dispositif de communication radio de 2,4 GHz pouvant communiquer jusqu'à 3 km. Précisons qu'en cas de perte de signal, le drone est capable d'assurer les consignes qui lui ont été transmises avant le décollage ou de revenir à son point de départ selon le choix fait par l'utilisateur.

En cas de situations particulières ou d'urgences telles que l'intrusion d'hélicoptère et d'oiseaux ou encore d'un changement inattendu des conditions de vent par exemple, l'eBee peut réaliser sous contrôle de l'utilisateur une série de manœuvres d'urgences (un atterrissage d'urgence, une ascension rapide, une descente rapide et même une vrille). Ces situations ont d'ailleurs été rencontrées à plusieurs reprises lors de nos observations sur le massif de la Cristallère.

#### **III.2.2.1 Traitement des données**

Le traitement des données est réalisé avec le logiciel Postflight Terra 3D de Pix4D fourni par le constructeur du drone senseFly : il nécessite 3 étapes indispensables avec un contrôle qualité mené en parallèle.

Précisons qu'une étape préalable est nécessaire avec le logiciel emotion 2 pour associer les images au plan de vol réellement effectué : les images sont ainsi géolocalisées.

Les 3 étapes nécessaires ensuite pour obtenir une orthomosaïque d'images et un modèle numérique 3D sont les suivantes et illustrées ci-après pour l'une des campagnes effectuées sur le massif de la Cristallère, celle de 2015 :

- i) La première étape correspond au traitement initial du projet. Les paramètres de la caméra sont optimisés en utilisant les méthodes AAT (« Automatic Aerial Triangulation ») et BBA (« Bundle Block Adjustment »). C'est une étape cruciale pour le projet (cf. SenseFly, 2014). Cette étape permet de configurer les propriétés des images (orientation et calibration des images) et proposer un nuage de points 3D épars texturé (cf. Figure III.12). Les images doivent être ici étalonnées en un seul bloc sinon cette étape doit être optimisée pour répondre à cette attente. C'est également ici que les points de contrôle au sol (GCP ou checkpoint) sont pointés sur le nuage.
- ii) La deuxième étape permet de densifier le nuage de points 3D en utilisant des points clefs supplémentaires (cf. Figure III.13).
- iii) La troisième étape permet d'obtenir un nuage de points 3D densifié texturé et de restituer les données de sorties importables dans un Système d'Information Géographique pour effectuer un différentiel de plusieurs campagnes par exemple (cf. Figure III.14).

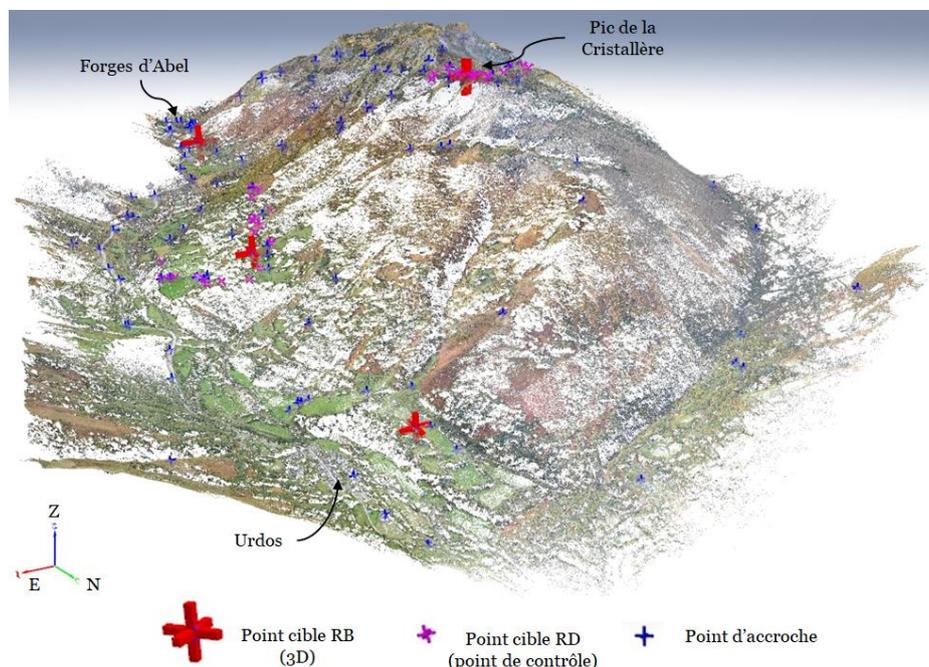


Figure III.12. Étape 1 : exemple de nuage 3D épars texturé obtenu pour la campagne 2015.

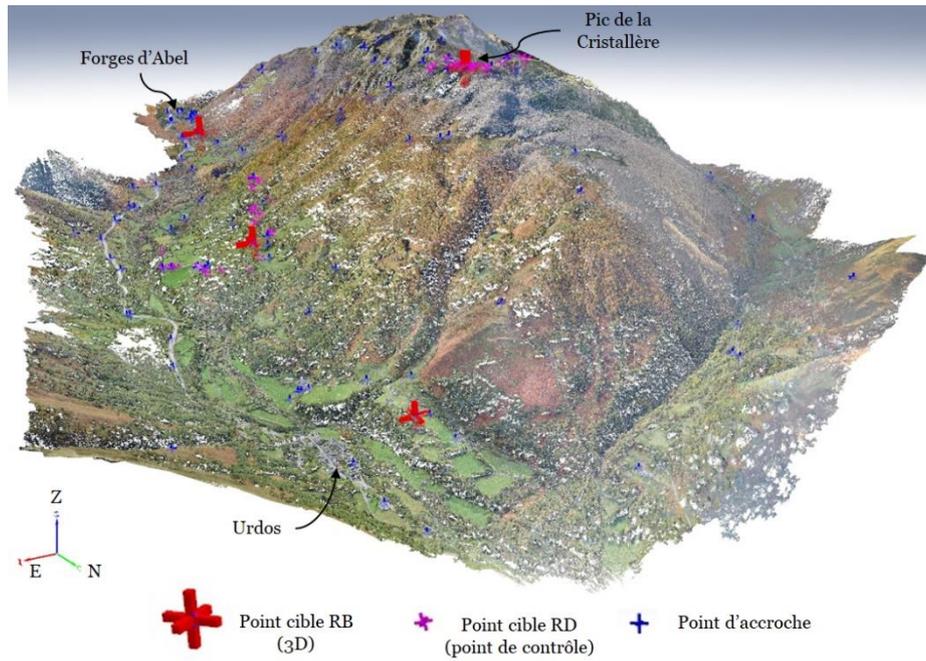


Figure III.13. Étape 2 : exemple de nuage 3D densifié texturé obtenu pour la campagne 2015.

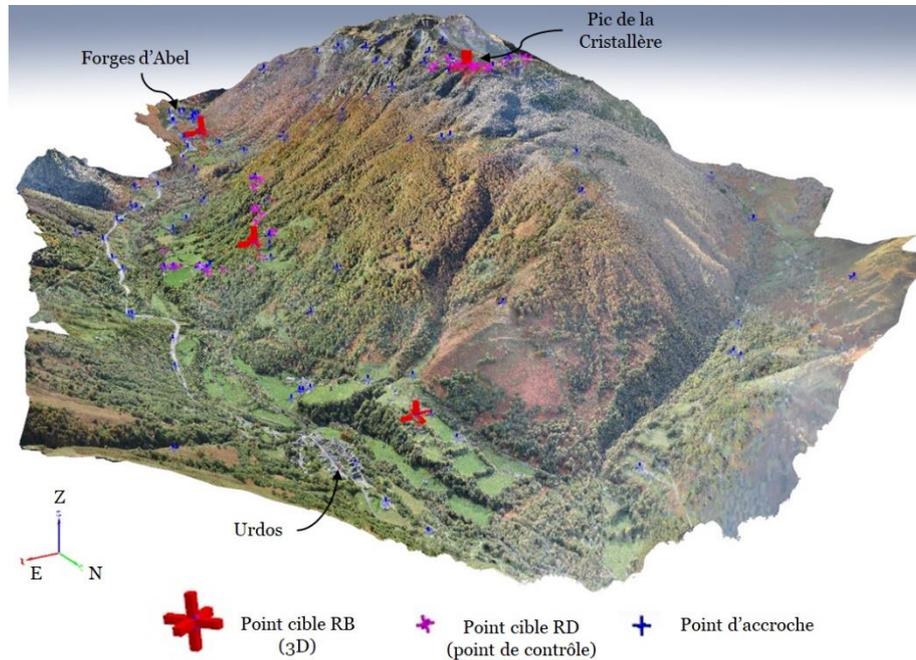


Figure III.14. Étape 3 : exemple de nuage 3D densifié texturé complet obtenu pour la campagne 2015.

L'étape 1 doit être réalisée séparément pour chaque vol même si une campagne compte plusieurs vols ; les sous-projets ainsi créés sont ensuite fusionnés et accrochés par des points communs (points d'accroche) dans un même projet pour poursuivre le traitement. Notre retour d'expérience permet d'affirmer que ce protocole est bien plus adapté dès lors qu'il y a 2 vols ; SenseFly (2014) le propose seulement dès que le nombre d'images est imposant.

Deux contrôles de qualité doivent être réalisés lors du traitement afin d'obtenir une orthomosaïque et un modèle numérique de surface la plus réaliste possible (simplifié ou non selon la résolution choisie), comme illustré ci-après (cf. Figure III.15) :

- i) Un premier contrôle visuel du nuage de points 3D ;
- ii) Un deuxième contrôle des données à l'aide du rapport qualité généré automatiquement par le logiciel (cf. SenseFly, 2014).

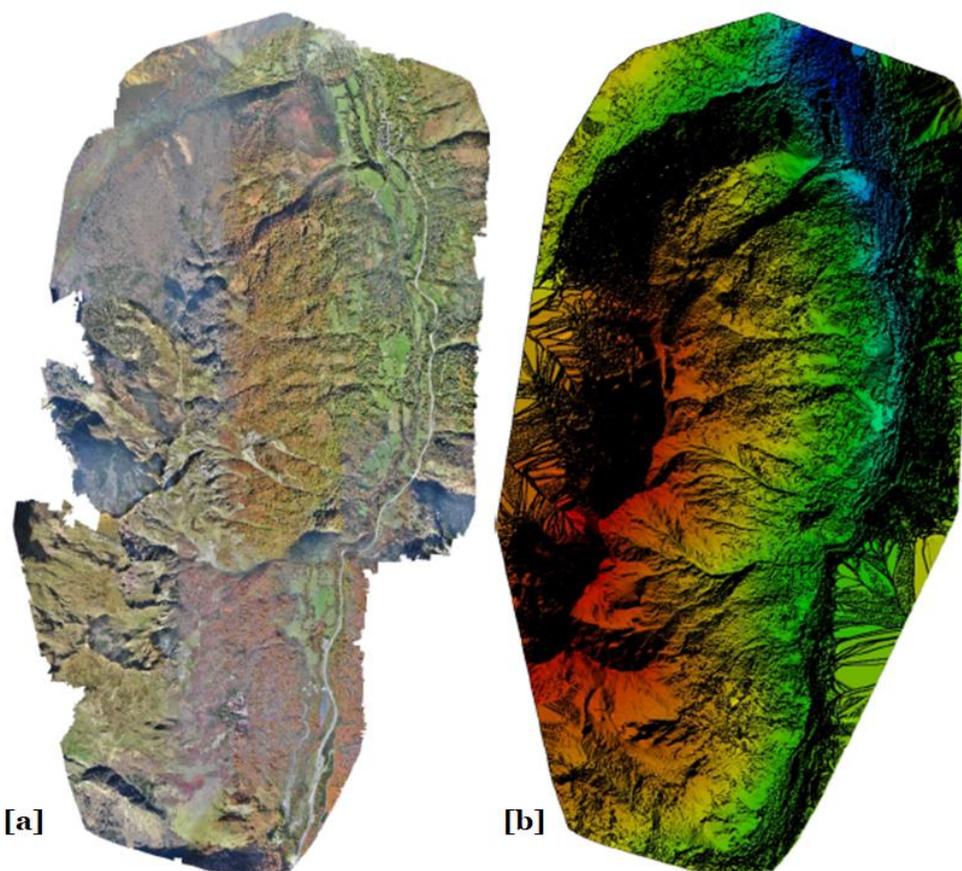


Figure III.15. Exemple de données de sorties pour la campagne de l'automne 2015 : orthomosaïque d'images [a] et modèle numérique de surface simplifié [b].

### III.2.3 SYNTHÈSE DES OBSERVATIONS EFFECTUÉES SUR LE MASSIF DE LA CRISTALLÈRE

Le calendrier de l'ensemble des observations aériennes effectuées sur le massif de la Cristallère est présenté dans le tableau ci-après (cf. Tableau II.4). Nous précisons pour les campagnes de 2014 et de 2016 les zones géographiques concernées. Seule la campagne de 2015 assure en fait une couverture de l'ensemble du massif de la Cristallère.

Tableau III.4. Chronologie de l'ensemble des campagnes d'observations effectuées avec le drone.

<i>Campagne</i>	<i>Numéro de vol</i>	<i>Date d'acquisition</i>	<i>Zone concernée</i>
<i>2014</i>	2014_V1	01/11/2014	Partie sommitale du DSL de la Cristallère
	2014_V2	01/11/2014	La Pène du Thès (zone active du DSL de la Cristallère)
<i>2015</i>	2015_V1	15/10/2015	Ensemble du massif de la Cristallère
	2015_V2	15/10/2015	
	2015_V3	16/10/2015	
	2015_V4	16/10/2015	
	2015_V5	16/10/2015	
	2015_V6	16/10/2015	
	2015_V7	16/10/2015	
	2015_V8	16/10/2015	
	2015_V9	22/10/2015	
	2015_V10	22/10/2015	
	2015_V11	23/10/2015	
	2015_V12	23/10/2015	
	2015_V13	24/10/2015	
	2015_V14	23/10/2015	
	2015_V15	23/10/2015	
	2015_V16	23/10/2015	
	2015_V17	23/10//2015	
	2015_V18	24/10/2015	
	2015_V19	24/10/2015	
	2015_V20	24/10/2015	
	2015_V21	14/11/2015	
	2015_V22	14/11/2015	
	2015_V23	14/11/2015	
	2015_V24	14/11/2015	
	2015_V25	15/11/2015	

Tableau III.4. *(suite)*

<i>Campagne</i>	<i>Numéro de vol</i>	<i>Date d'acquisition</i>	<i>Zone concernée</i>
<i>2015</i>	2015_V26	15/11/2015	Ensemble du massif de la Cristallère
	2015_V27	15/11/2015	
	2015_V28	15/11/2015	
<i>2016</i>	2016_V1	07/06/2016	La Pène du Thès (zone active du DSL de la Cristallère)
	2016_V2	08/06/2016	Glissement rocheux du Peilhou

Nous avons obtenu exactement 2 vols pour la campagne 2014, 28 vols pour la campagne 2015 et 2 vols pour la campagne 2016. La campagne de 2016 a été écourtée suite à un crash de l'appareil.

### III.3 SYNTHÈSE DE LA METHODOLOGIE

Nous présentons ici une synthèse de l'ensemble des mesures et des observations faites entre 2014 et 2016 sur le massif de la Cristallère dans le cadre de ce travail (cf. Figure III.16), à savoir :

- Le positionnement par satellites DGNSS (« Differential Global Navigation Satellite Systems ») de cibles terrestres avec la constellation américaine GPS (« Global Positioning System ») et la constellation russe GLONASS (acronyme russe) (cf. partie III.1) ;
- Les observations avec un drone type aile volante équipée d'un capteur spectral RGB (cf. partie III.2).

Une période de visite à la demande et une étude à moindre coût sont les avantages majeurs de l'utilisation du positionnement par satellites ou de l'observation avec un drone du type aile volante pour une simple reconnaissance ou l'auscultation complète d'un site. Ces deux méthodes sont très complémentaires, l'une permettant un suivi particulièrement précis, l'autre permettant d'analyser des zones dangereuses ou inaccessibles. Ou encore l'une permettant d'obtenir des vitesses ou un suivi des mouvements, l'autre permettant un recul et une vision idéale pour un géologue, en particulier dans l'analyse des grands ensembles ou des systèmes de fracturation qui complètent les relevés géologiques terrestres très souvent partiels pour un site de cette ampleur.

Si l'ensemble du travail présenté ici est particulièrement axé sur les méthodes de suivi topographique pour connaître la dynamique à court terme d'une instabilité gravitaire de grande ampleur dans les Pyrénées, des relevés géophysiques complémentaires ont été également réalisés en parallèle (cf. Figure III.16) :

- 5 tomographies de résistivités électriques ont été réalisées en partie basse du massif avec le résistivimètre IRIS Syscal PRO puis inversées avec le logiciel RES2DInv (Loke & Barker, 1996) pour obtenir des pseudo-sections de résistivités (cf. Schmutz, 2000 par exemple ou encore LCPC, 2004 pour plus de précisions sur cette application largement usitée par la communauté scientifique) ;
- Plusieurs profils électromagnétiques sommaires basés sur l'utilisation d'ondes de basse fréquence VLF (« Very Low Frequencies ») ont été réalisés avec le récepteur à encombrement réduit EM16 de Geonics (Geonics Limit, 1979) et les stations émettrices DHO38 (située en Allemagne ; fréquence de 23,4 kHz) et GBZ (située en Angleterre ; fréquence de 19,6 kHz) au niveau de la partie sommitale du massif, un

secteur difficile d'accès (cf. LCPC, 2004 par exemple pour plus de précisions sur cette application).

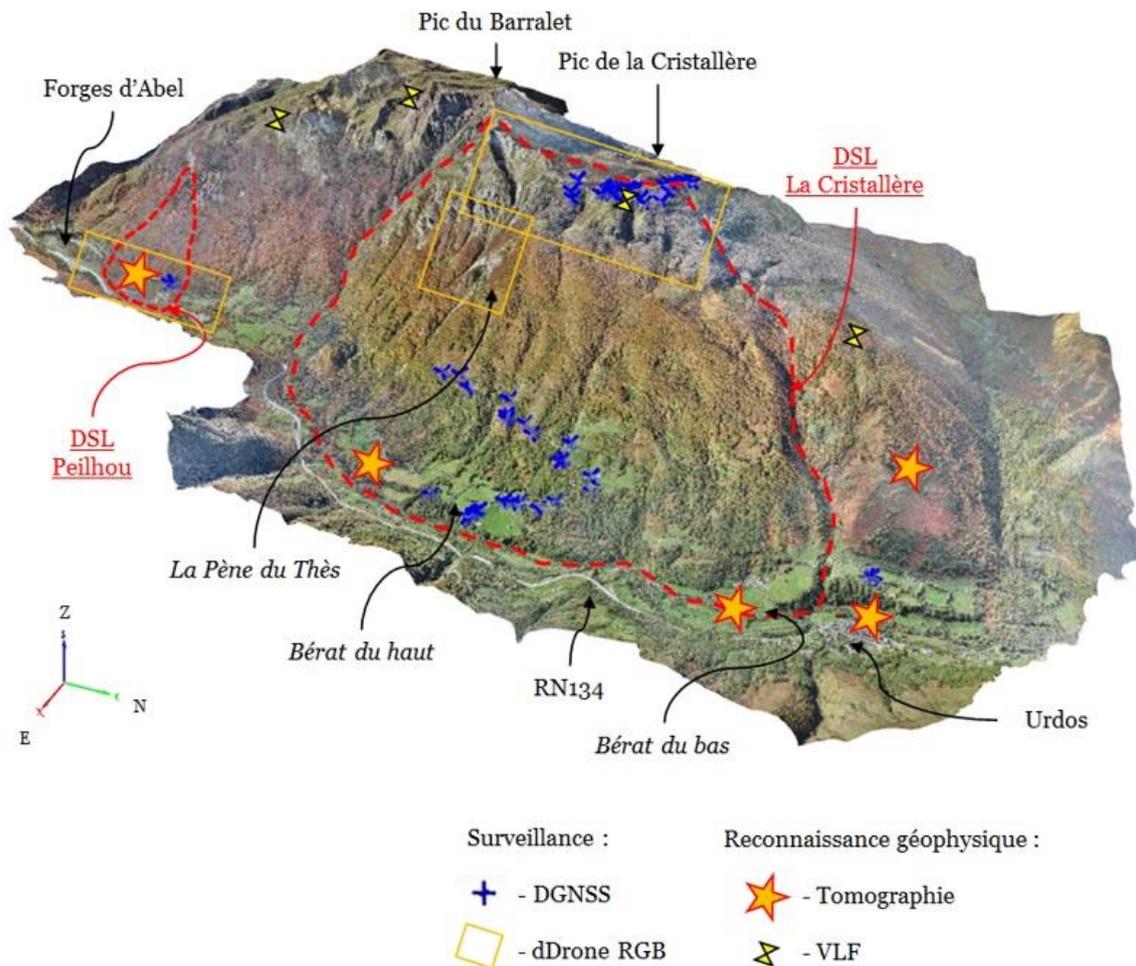


Figure III.16. Synthèse de l'ensemble des mesures et des observations faites sur le massif de la Cristallère. Commentaires dans le texte.

Remarquons que les applications développées dans ce travail pour l'analyse des déformations d'un versant rocheux instable se veulent générales et devraient donc pouvoir être utilisées pour surveiller les mouvements de terrain plus superficiels et plus rapides en d'autres lieux. Cependant, notons que toutes les technologies automatisées et sophistiquées doivent être parfaitement maîtrisées par les utilisateurs.

## IV. RESULTATS ET DISCUSSION



La partie résultats et discussion se compose de trois parties :

- Une première partie où sont présentés les résultats du positionnement par satellites DGNSS avec les constellations GPS et GLONASS (cf. partie IV.1). C'est dans cette partie que nous validons la méthode avec pivot temporaire par rapport à celle plébiscitée par la communauté scientifique (multistations RGP). Nous soulignons les déplacements minimum avérés (planimétrie et altimétrie) obtenus au niveau des points cibles du réseau de base et des deux réseaux de détails du massif de la Cristallère.
- Une deuxième partie où sont présentés les résultats des observations avec un drone du type aile volante RGB (cf. partie IV.2). Nous présentons surtout les modèles issus des 3 campagnes (automne 2014, automne 2015 et printemps 2016) réalisées sur le massif de la Cristallère.
- Une troisième partie où nous synthétisons et discutons l'ensemble des résultats obtenus avec ces deux premières applications majeures dans le cadre de ce travail (cf. partie IV.3). Ces applications sont complémentaires pour permettre de surveiller une instabilité gravitaire. Un couplage avec les relevés géologiques et géophysiques réalisés sur le massif de la Cristallère est effectué ici. Cela nous permet in fine de proposer un modèle dynamique actuel pour le DSL de la

Cristallère et donc d'apporter des éléments de réponse pour la communauté scientifique à la question posée ci-avant : quelle dynamique à court terme pour une instabilité gravitaire de grande ampleur dans les Pyrénées ?

## IV.1 RESULTATS COMMENTES DE L'AUSCULTATION PAR SATELLITES : DGNSS (CONSTELLATIONS GPS & GLONASS)

Nous présentons et analysons ici les résultats obtenus à partir de l'auscultation DGNSS (constellations GPS & GLONASS) pour les points cibles RB du réseau de base, les points cibles RDA du réseau de détail n°1 et les points cibles RDB du réseau de détail n°2 pour les 2 méthodes de positionnement utilisées (cf. Figure IV.1) : multistations RGP ou pivot temporaire avec un protocole statique géodésique (ligne de base inférieure à 10 km) ou statique rapide (ligne de base inférieure à 1 km).

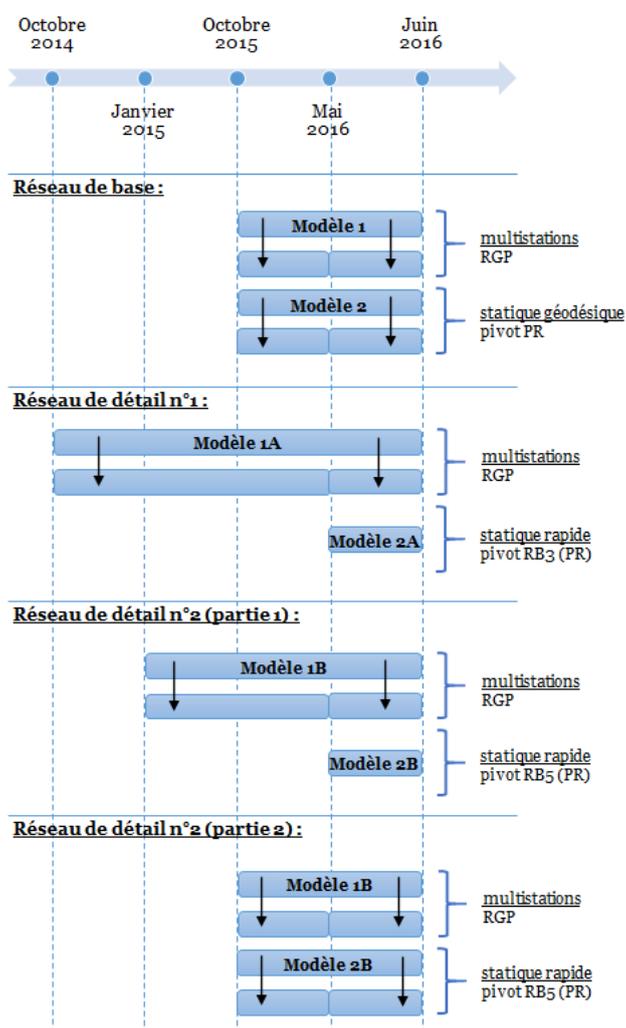


Figure IV.1. Résumé des méthodes utilisées pour l'auscultation DGNSS sur le massif de la Cristallère. RGP : Réseau Géodésique Permanent. PR : Point de référence. RB<sub>3</sub> et RB<sub>5</sub> : deux points cibles du réseau de base du massif de la Cristallère.

Pour simplifier la compréhension de nos propos pour la présentation des différents modèles du massif de la Cristallère, nous adoptons la convention suivante :

- i) Si le déplacement altimétrique d'un point cible est positif, les terrains de la zone environnante s'affaissent ;
- ii) Si le déplacement altimétrique d'un point cible est négatif, les terrains de la zone environnante se soulèvent ;
- iii) Si le déplacement planimétrique d'un point cible est dans le sens de la pente du versant (direction ouest pour le versant ouest et direction est pour le versant est), les terrains de la zone environnante progressent ;
- iv) Si le déplacement planimétrique d'un point cible est dans le sens contraire de la pente du versant (direction est pour le versant ouest et direction ouest pour le versant est), les terrains de la zone environnante reculent ;
- v) S'il n'y a pas de déplacement altimétrique et de déplacement planimétrique d'un point cible, les terrains de la zone environnante sont stables.

#### **IV.1.1 RESULTATS POUR LE RESEAU DE BASE (MASSIF DE LA CRISTALLERE A PETITE ECHELLE)**

Nous présentons et analysons ici les résultats obtenus à partir de l'auscultation DGNS (constellations GPS & GLONASS) pour les 6 points cibles RB du réseau de base (RB1 à RB6). Les positions tridimensionnelles de ces points cibles ont été enregistrées le 1<sup>er</sup> octobre 2015, le 16 mai et le 3 juin 2016. La durée d'étude globale de ce réseau est de 246 jours. Nous rappelons ci-après les caractéristiques principales de ces 6 points cibles RB (cf. Tableau IV.1).

*Tableau IV.1. Rappel des caractéristiques principales des 6 points cibles RB du réseau de base du massif de la Cristallère (cf. partie III.1 pour plus de précisions).*

<b>Point cible</b>	<b>Secteur géographique</b>	<b>Altitude (m NGF)</b>	<b>Repères pour aider à la compréhension du texte</b>
<i>RB1</i>	Cabane Pacheu	1463	Zone centrale du massif de la Cristallère Point bas du versant ouest
<i>RB2</i>	Pic de la Cristallère & Col de la Coumette	1786	Zone centrale du massif de la Cristallère Point haut du versant est
<i>RB3</i>	Pic de la Cristallère & Col de la Coumette	1789	Zone centrale du massif de la Cristallère Point haut du versant ouest
<i>RB4</i>	Bérat du bas	818	Zone nord du massif de la Cristallère Point bas du versant est
<i>RB5</i>	Bérat du haut	1043	Zone centrale du massif de la Cristallère Point bas du versant est
<i>RB6</i>	Peilhou	1066	Zone sud du massif de la Cristallère Point bas du versant est

Deux méthodes de positionnement par satellites ont été utilisées dans le cadre de cette étude pour ce réseau : la méthode de positionnement multistations RGP (cf. modèle n°1) et la méthode de positionnement statique pivot PR (cf. modèle n°2). Ces deux méthodes sont expliquées dans la partie méthodologique de ce manuscrit (cf. partie III.1).

Notons que les coordonnées tridimensionnelles des 6 points cibles RB du réseau de base figurent en annexe (p. 211-221) pour chaque prise de mesure (le 1<sup>er</sup> octobre 2015, le 16 mai et le 3 juin 2016) et selon la méthode de positionnement utilisée (la méthode de positionnement multistations RGP ou la méthode de positionnement statique pivot PR). Nous y indiquons la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93, l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres, la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres à chaque fois. L'évolution en mètres de la composante est (E) et l'évolution de la composante nord (N) reportée dans le système RGF93 Lambert 93 en sus de l'évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) pour chaque point cible RB du réseau de base sont illustrées également en annexe 1 (p. 211-221).

#### **IV.1.1.1 Modèle n°1 : Résultats avec la méthode de positionnement multistations RGP**

Pour le modèle n°1, les déplacements altimétriques et planimétriques des 6 points cibles RB du réseau de base mesurés avec la méthode de positionnement multistations RGP entre le 1<sup>er</sup> octobre 2015 et le 3 juin 2016 sont illustrés (cf. Figure IV.2) ci-après ; ils sont issus de la différence entre les positions moyennes de chaque prise de mesure.

Nous concluons pour le modèle n°1 simplement par un schéma de synthèse pour l'ensemble du massif de la Cristallère (modèle n°1 ; cf. Figure IV.3) où sont présentés les terrains qui s'affaissent ou se soulèvent, qui reculent ou progressent : nous estimons d'ailleurs la vitesse moyenne annuelle d'évolution de ces zones pour chaque période en fonction des positions moyennes obtenues pour chaque point cible avec cette première méthode (stations RGP).

#### **IV.1.1.2 Modèle n°2 : Résultats avec la méthode de positionnement statique pivot PR / Comparaison avec le modèle n°1**

Pour le modèle n°2, les déplacements altimétriques et planimétriques des 6 points cibles RB du réseau de base mesurés avec la méthode de positionnement statique pivot PR entre le 1<sup>er</sup> octobre 2015 et le 3 juin 2016 sont illustrés (cf. Figure IV.4) ci-après ; comme pour le modèle n°1, ils sont issus de la différence entre les positions moyennes de chaque prise de mesure.

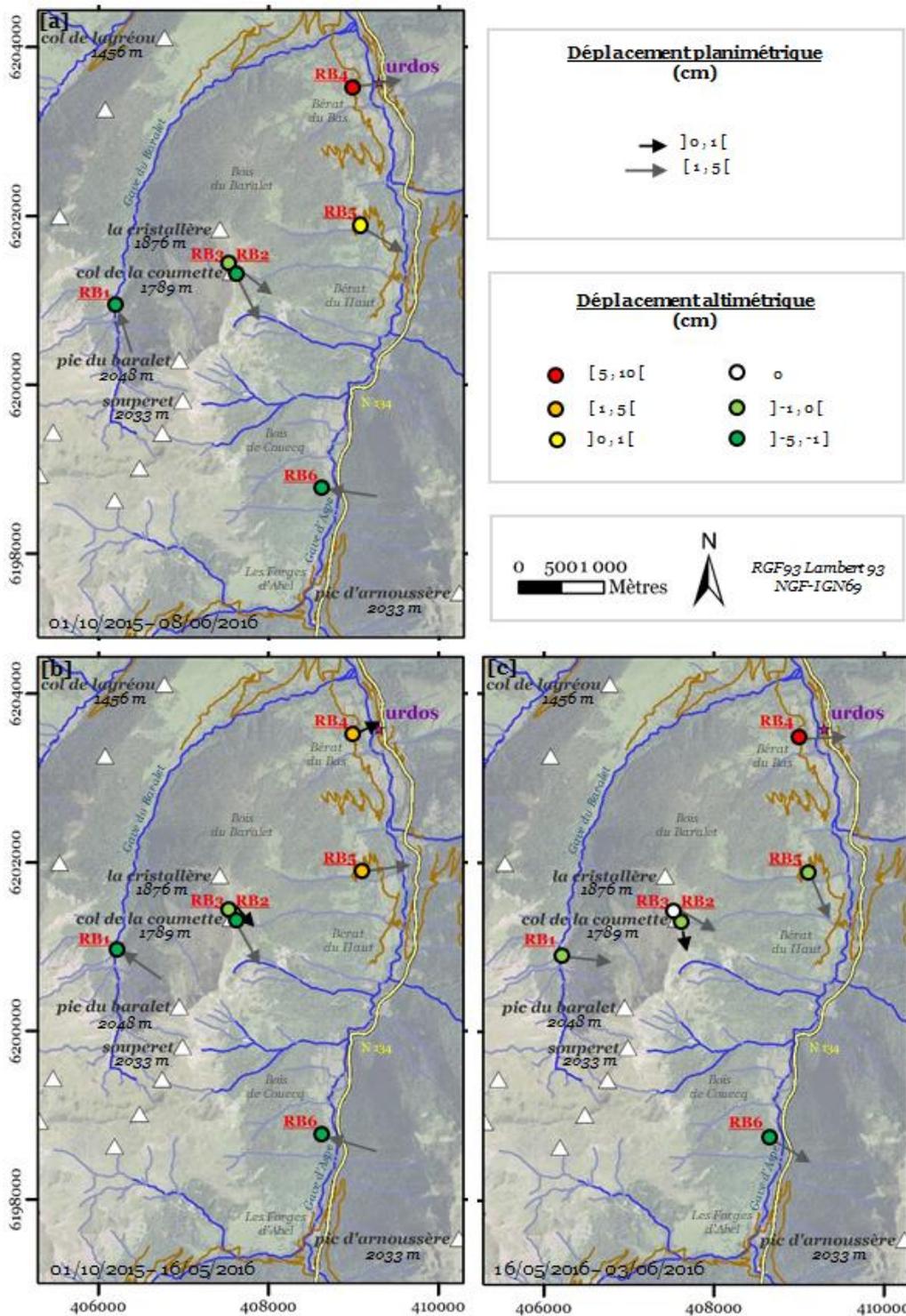


Figure IV.2. Déplacements altimétriques et planimétriques des points cibles RB du réseau de base mesurés avec la méthode de positionnement multistations RGP entre [a] le 1<sup>er</sup> octobre 2015 et le 3 juin 2016 ; [b] le 1<sup>er</sup> octobre 2015 et le 16 mai 2016 ; [c] le 16 mai et le 3 juin 2016.

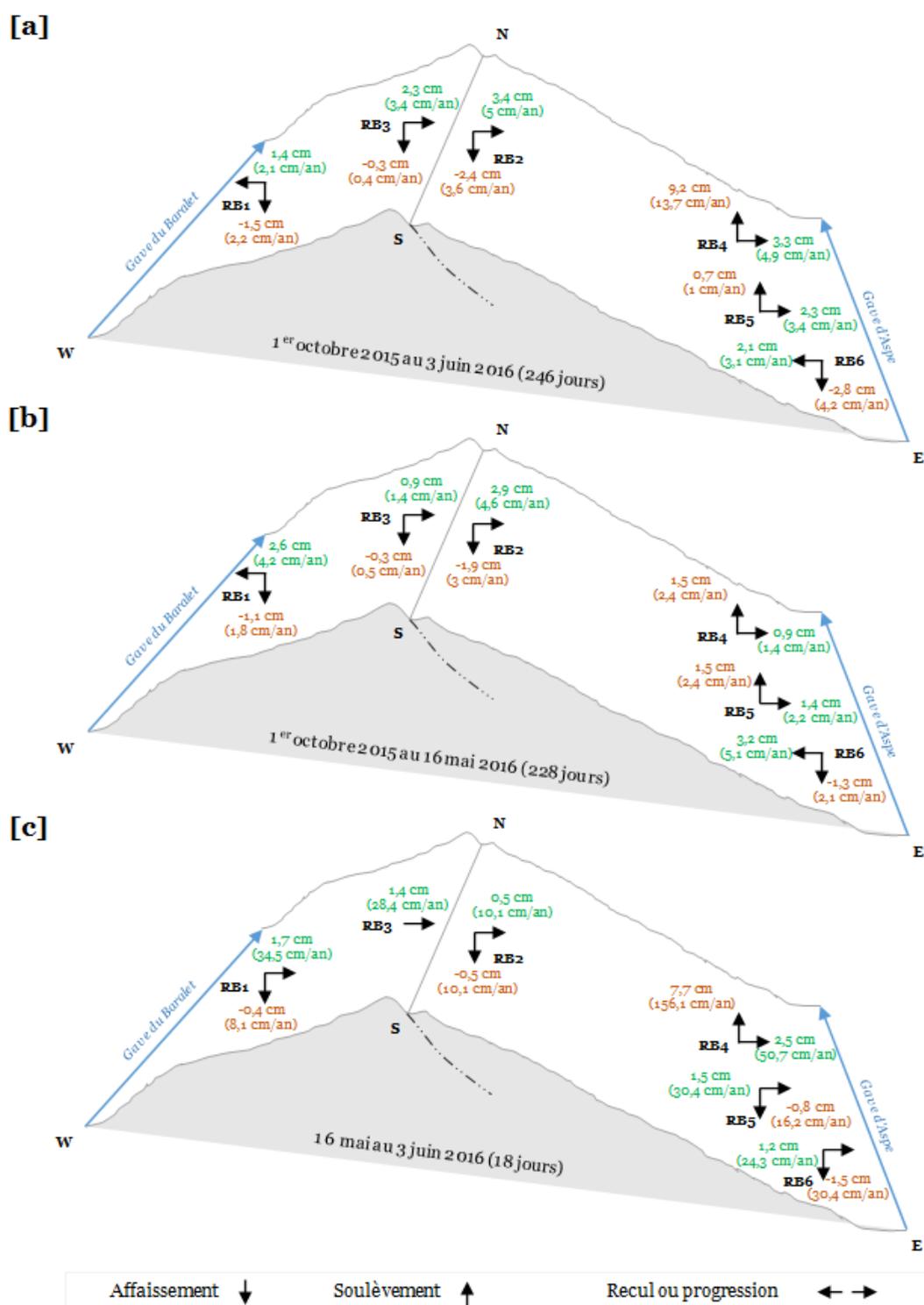


Figure IV.3. Schéma de synthèse du modèle n°1 (méthode de positionnement multistations RGP) : entre [a] le 1<sup>er</sup> octobre 2015 et le 3 juin 2016 ; [b] le 1<sup>er</sup> octobre 2015 et le 16 mai 2016 ; [c] le 16 mai et le 3 juin 2016.

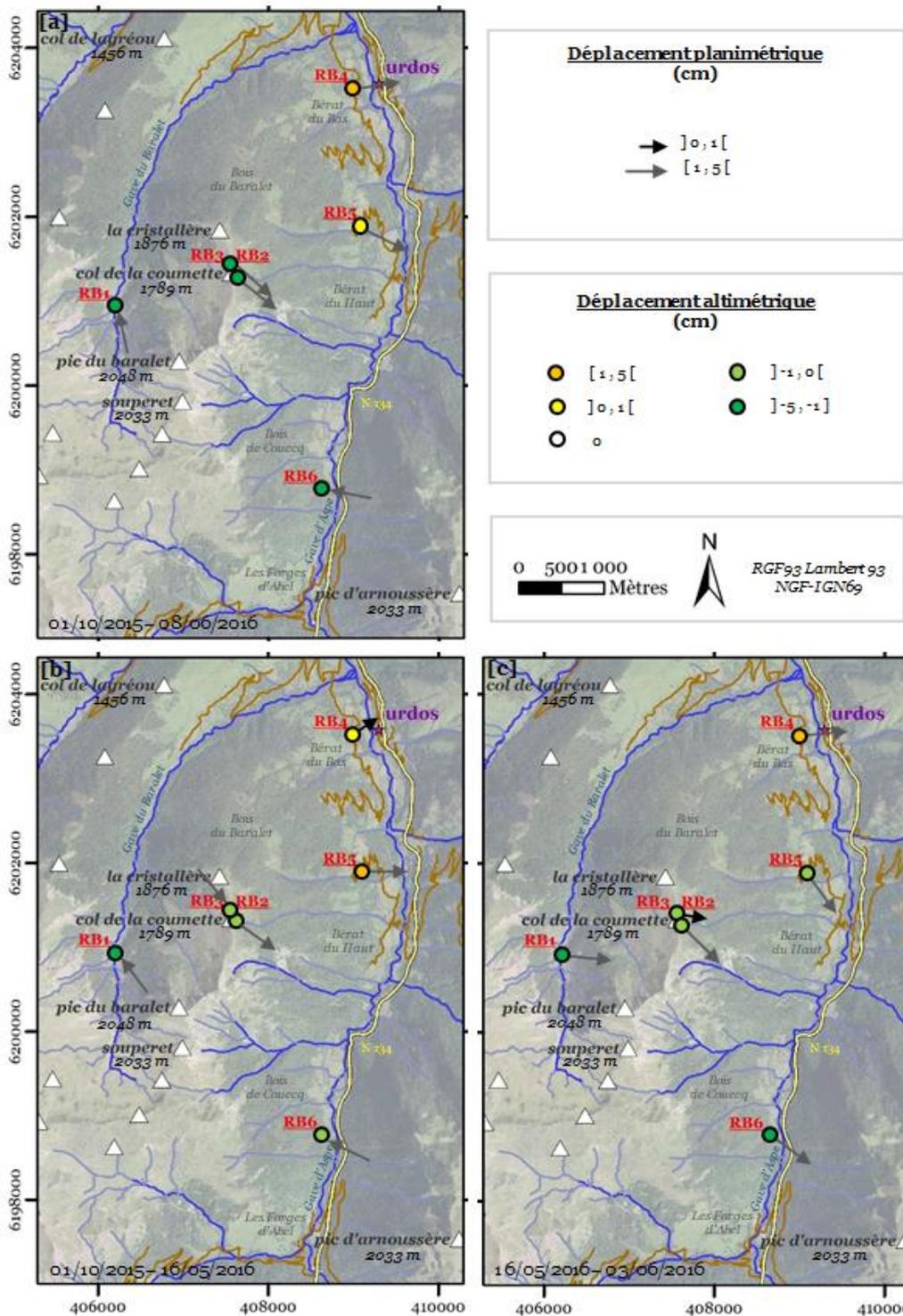


Figure IV.4. Déplacements altimétriques et planimétriques des points cibles RB du réseau de base mesurés avec la méthode de positionnement statique pivot PR entre [a] le 1<sup>er</sup> octobre 2015 et le 3 juin 2016 ; [b] le 1<sup>er</sup> octobre 2015 et le 16 mai 2016 ; [c] le 16 mai et le 3 juin 2016.

Nous concluons simplement par un schéma de synthèse de l'ensemble du massif de la Cristallère (modèle n°2 ; cf. Figure IV.5) où sont présentés les terrains qui s'affaissent ou se soulèvent, qui reculent ou progressent : nous estimons d'ailleurs la vitesse moyenne annuelle d'évolution de ces zones en fonction des positions moyennes obtenues pour chaque point cible avec cette deuxième méthode (statique pivot PR).

#### **IV.1.1.3 Précisions altimétriques et planimétriques des points cibles RB du réseau de base : méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1) versus méthode de positionnement statique pivot PR (modèle n°2)**

Nous commentons ci-après les précisions altimétriques et planimétriques des 6 points cibles RB du réseau de base obtenues avec la méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1 ; cf. partie IV.1.1.1) et avec la méthode de positionnement statique pivot PR (modèle n°2 ; cf. partie IV.1.1.2) dans le cadre de cette étude DGNSS (constellations GPS & GLONASS).

##### **a) Commentaires sur les précisions altimétriques (dV) des points cibles RB**

Avec la méthode de positionnement multistations RGP, la meilleure précision altimétrique obtenue est de +/- 4,7 cm le 16 mai 2016 au point cible RB3 (cf. Tableau IV.2, p. 129). La plus mauvaise précision altimétrique, d'une valeur de +/- 7 cm, a été enregistrée le 1<sup>er</sup> octobre 2015 au point cible RB6 (cf. Tableau IV.2). Nous remarquons d'ailleurs que la plus mauvaise précision altimétrique a été relevée avec cette méthode de positionnement systématiquement à cet endroit (cf. Tableau IV.2) : c'est en fait géographiquement le point cible le plus éloigné des stations RGP utilisées dans le cadre de cette étude avec cette méthode (cf. partie III.1).

Avec la méthode de positionnement statique pivot PR, la meilleure précision altimétrique obtenue est de +/-1,4 cm le 16 mai 2016 au point cible RB6 (cf. Tableau IV.2). Elle a été relevée avec cette méthode de positionnement constamment sur ce point cible (1,7 cm le 1<sup>er</sup> octobre 2015 et 1,5 cm le 3 juin 2016 ; cf. Tableau IV.2) alors qu'avec la méthode de positionnement multistations RGP, rappelons-le, ce point cible affichait toujours la plus mauvaise précision (cf. § précédent). L'explication serait simple : le point cible RB6 est cette fois-ci géographiquement le point le plus proche du pivot, le point de référence PR, utilisé dans le cadre de cette étude avec cette méthode (cf. partie III.1). Aussi, la plus mauvaise précision altimétrique d'une valeur de +/-2,4 cm a été enregistrée le 16 mai 2016 au point cible RB4 et le 3 juin 2016 au point cible RB5 (cf. Tableau IV.2).

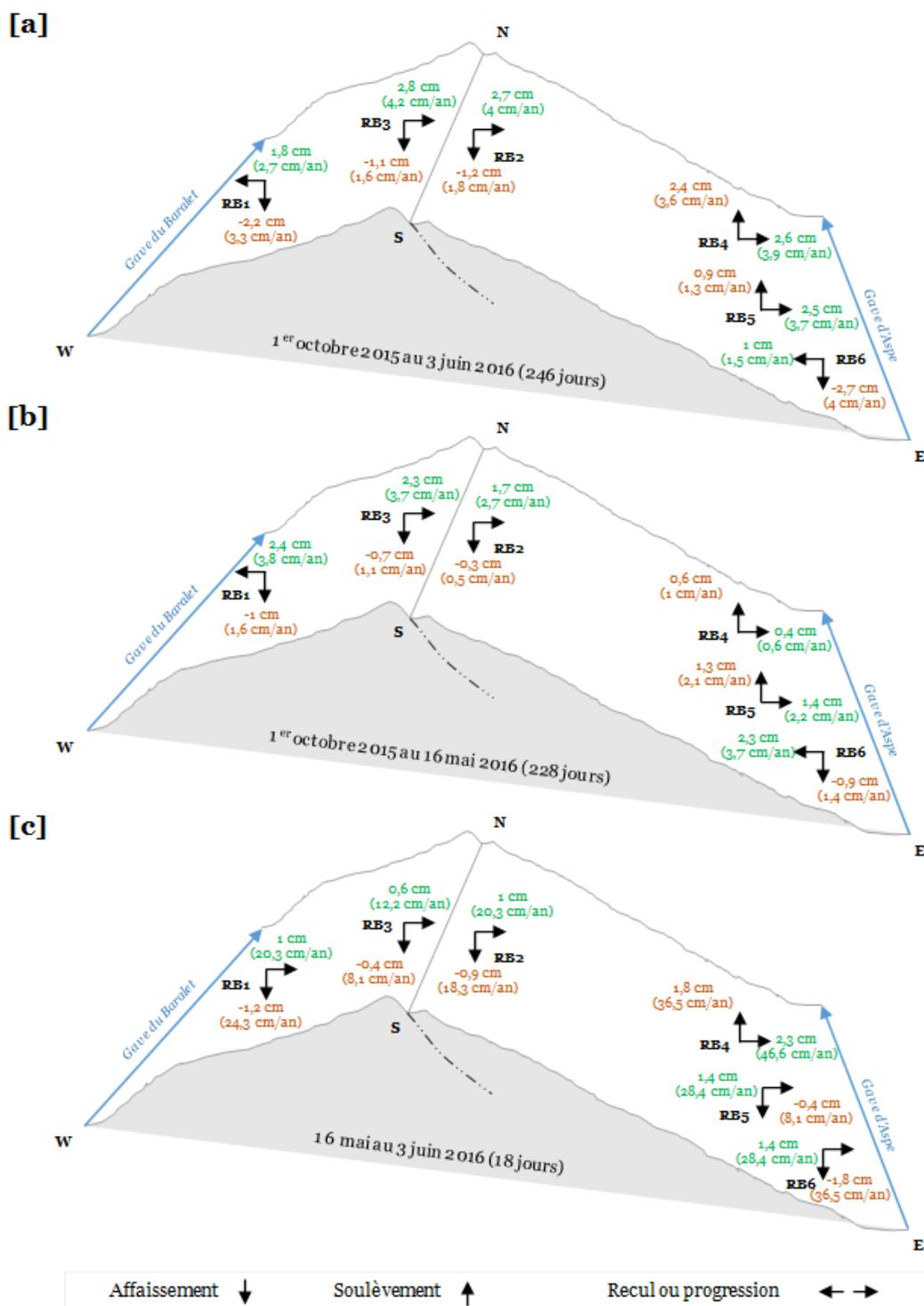


Figure IV.5. Schéma de synthèse du modèle n°2 (méthode de positionnement statique pivot PR) : entre [a] le 1<sup>er</sup> octobre 2015 et le 3 juin 2016 ; [b] le 1<sup>er</sup> octobre 2015 et le 16 mai 2016 ; [c] le 16 mai et le 3 juin 2016.

Tableau IV.2. Précisions altimétriques dV en centimètres des mesures moyennes des 6 points cibles RB du réseau de base du massif de la Cristallère : méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1) versus méthode de positionnement statique pivot PR (modèle n°2).

Point cible	1er octobre 2015		16 mai 2016		3 juin 2016	
	Modèle n°1	Modèle n°2	Modèle n°1	Modèle n°2	Modèle n°1	Modèle n°2
RB1	6,2	2,1	5,2	2,1	5,2	1,9
RB2	6,6	1,8	5	1,6	5,4	2,3
RB3	5,9	1,8	4,7	1,7	5,9	1,8
RB4	5,6	1,9	5,4	2,4	5,2	2,3
RB5	5,5	1,7	5,2	2,2	5,5	2,4
RB6	7	1,7	6,3	1,4	6,3	1,5
Minimum	5,5	1,7	4,7	1,4	5,2	1,5
Maximum	7	2,1	6,3	2,4	6,3	2,4
Moyenne	6,1	1,8	5,3	1,9	5,6	2

Nous obtenons en somme de bien meilleures précisions altimétriques avec la méthode de positionnement statique pivot PR (modèle n°2) qu'avec la méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1) : les données altimétriques obtenues avec le point de référence PR sont comprises entre +/-1,4 et +/-2,4 cm, alors qu'avec les stations RGP elles sont comprises entre +/-4,7 et +/-7 cm (cf. Tableau IV.2). Le modèle n°2 (celui avec le pivot PR) est donc ici plus précis que le modèle n°1 (celui avec les stations RGP).

#### b) Commentaires sur les précisions planimétriques (dH) des points cibles RB

Avec la méthode de positionnement multistations RGP, la meilleure précision planimétrique d'une valeur de +/-2,8 cm a été enregistrée le 16 mai 2016 au point cible RB4 et le 3 juin 2016 au point cible RB5 (cf. Tableau IV.3). La plus mauvaise précision planimétrique que nous avons obtenue est de +/-4,6 cm le 16 mai et le 3 juin 2016 au point cible RB6 (cf. Tableau IV.3). Précisons d'ailleurs que la plus mauvaise précision planimétrique a été relevée avec cette méthode de positionnement presque systématiquement à cet endroit (cf. Tableau IV.3) comme la plus mauvaise précision altimétrique (cf. partie précédente) : ce point cible est, rappelons-le, géographiquement le point le plus éloigné des stations RGP (cf. partie III.1).

Avec la méthode de positionnement statique pivot PR, la meilleure précision planimétrique d'une valeur de +/-1 cm a été enregistrée le 1<sup>er</sup> octobre 2015, le 16 mai et le 3 juin 2016 au point cible RB6 (cf. Tableau IV.3). Ce résultat était attendu compte tenu des conclusions que nous avons faites précédemment (cf. partie précédente) : ce point cible est géographiquement le point le plus proche du pivot PR utilisé dans le cadre de cette étude avec

cette méthode (cf. partie III.1). La plus mauvaise précision planimétrique avons obtenue est de +/-1,6 cm le 3 juin 2016 au point cible RB1 (cf. Tableau IV.3). C'est d'ailleurs ce point cible qui affiche la plus mauvaise précision planimétrique pour chaque prise de mesure avec cette méthode, à savoir +/-1,4 cm le 1<sup>er</sup> octobre 2015 et +/-1,5 cm le 16 mai 2016 (cf. Tableau IV.3) : c'est un des points géographiquement les plus éloignés du point de référence PR (cf. partie III.1).

Tableau IV.3. Précisions planimétriques dH en centimètres des mesures moyennes des 6 points cibles RB du réseau de base du massif de la Cristallère : méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1) versus méthode de positionnement statique pivot PR (modèle n°2).

Point cible	1er octobre 2015		16 mai 2016		3 juin 2016	
	Modèle n°1	Modèle n°2	Modèle n°1	Modèle n°2	Modèle n°1	Modèle n°2
RB1	4,3	1,4	3,7	1,5	4	1,6
RB2	3,9	1,1	4,3	1,2	2,9	1,1
RB3	3,8	1,2	3,3	1,2	3	1,3
RB4	3,9	1,4	2,8	1,4	3	1,4
RB5	4	1,2	4	1,2	2,8	1,2
RB6	3,6	1	4,6	1	4,6	1
Minimum	3,6	1	2,8	1	2,8	1
Maximum	4,3	1,4	4,6	1,5	4,6	1,6
Moyenne	3,9	1,2	3,8	1,3	3,4	1,3

Nous obtenons en somme de bien meilleures précisions planimétriques avec la méthode de positionnement statique pivot PR (modèle n°2) qu'avec la méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1) : les données planimétriques obtenues avec le point de référence PR sont comprises entre +/-1 et +/-1,6 cm alors qu'avec les stations RGP, elles sont comprises entre +/-2,8 et +/-4,6 cm (cf. Tableau IV.3). Le modèle n°2 (celui avec le pivot PR) est donc ici plus précis que le modèle n°1 (celui avec les stations RGP).

### c) Commentaires des précisions altimétriques (dV) par rapport aux précisions planimétriques (dH) des points cibles RB

Pour la suite de cette analyse, considérons le ratio dV/dH où dV est la précision altimétrique et dH la précision planimétrique d'un point cible. C'est un indicateur factuel qui nous permet de connaître la précision des données altimétriques par rapport à celle des données planimétriques. Si le ratio dV/dH est supérieur à 1, les données planimétriques sont plus précises que les données altimétriques ; à l'inverse, si le ratio dV/dH est inférieur à 1, les données planimétriques sont moins précises que les données altimétriques. Aussi, plus le ratio

$dV/dH$  est proche de 1, plus l'écart de précisions entre les données planimétriques et altimétriques est faible.

Nous remarquons que les précisions planimétriques des points cibles RB du réseau de base sont bien meilleures que les précisions altimétriques toutes méthodes confondues et pour toutes les prises de mesures (cf. Tableau IV.4). Si nous observons seulement les ratios des résultats issus de la méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1), le ratio le plus faible est de 1,2 au point cible RB2 le 16 mai 2016 et le ratio le plus élevé est de 2 aux points cibles RB3 et RB5 le 3 juin 2016 (cf. Tableau IV.4). Avec cette première méthode, les données altimétriques sont donc 1,2 à 2 fois moins précises que les données planimétriques pour ce réseau de base. Si nous observons, de la même manière, seulement les ratios des résultats issus de la méthode de positionnement statique pivot PR (modèle n°2), le ratio le plus faible est de 1,2 au point cible RB1 le 3 juin 2016 et le ratio le plus élevé est de 2,1 au point cible RB2 le 3 juin 2016 (cf. Tableau IV.4). Avec cette deuxième méthode, les données altimétriques sont donc de 1,2 à 2,1 fois moins précises que les données planimétriques pour ce réseau de base.

*Tableau IV.4. Quotient  $dV/dH$  des précisions altimétriques ( $dV$ ) et planimétriques ( $dH$ ) des mesures moyennes des 6 points cibles RB du réseau de base du massif de la Cristallère : méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1) versus méthode de positionnement statique pivot PR (modèle n°2).*

<b>Point cible</b>	<b>1er octobre 2015</b>		<b>16 mai 2016</b>		<b>3 juin 2016</b>	
	Modèle n°1	Modèle n°2	Modèle n°1	Modèle n°2	Modèle n°1	Modèle n°2
<i>RB1</i>	1,4	1,5	1,4	1,4	1,3	1,2
<i>RB2</i>	1,7	1,6	1,2	1,3	1,9	2,1
<i>RB3</i>	1,6	1,5	1,4	1,4	2	1,4
<i>RB4</i>	1,4	1,4	1,9	1,7	1,7	1,6
<i>RB5</i>	1,4	1,4	1,3	1,8	2	2
<i>RB6</i>	1,9	1,7	1,4	1,4	1,4	1,5

Ainsi, que ce soit la méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1) ou la méthode de positionnement statique pivot PR (modèle n°2), le rapport  $dV/dH$  est toujours compris entre 1 et 3 (cf. Tableau IV.4). Nous sommes en accord avec Duquenne et al. (2005) qui avaient déjà établi ce constat pour la méthode de positionnement multistations RGP. Nous nous apercevons cependant que même si les données altimétriques et planimétriques obtenues avec la méthode de positionnement statique pivot PR sont plus précises que celles obtenues avec la méthode de positionnement multistations RGP (cf. Tableau IV.2 & Tableau IV.3), les rapports  $dV/dH$  du modèle n°2, celui avec le pivot PR, ne sont pas ici significativement différents de ceux du modèle n°1, celui avec les stations RGP (cf. Tableau IV.4).

#### IV.1.1.4 Synthèse pour le réseau de base

Nous faisons tout d'abord une synthèse de la comparaison entre les 2 modèles présentés ci-avant (modèle n°1 avec la méthode de positionnement multistations RGP et modèle n°2 avec la méthode de positionnement statique géodésique pivot PR).

Nous présentons ensuite les déplacements minimaux avérés d'évolution au niveau des points cibles et les vitesses moyennes annuelles avérées pour l'ensemble du massif de la Cristallère. Nous verrons que seul le modèle n°2 nous permet en fait ici d'annoncer une évolution avérée au niveau de certains points cibles.

##### **a) Modèle n°1 (méthode de positionnement multistations RGP) versus modèle n°2 (méthode de positionnement statique pivot PR)**

Pour présenter et comparer les modèles 1 et 2, nous nous sommes intéressés aux déplacements moyens des points cibles du réseau de base du massif de la Cristallère et donc également aux vitesses moyennes annuelles d'évolution enregistrées selon la période pour le modèle n°1 (cf. partie IV.1.1.1) et pour le modèle n°2 (cf. partie IV.1.1.2). Que ce soit le modèle n°1 ou le modèle n°2, ces 2 modèles annoncent les mêmes tendances comme l'illustre le schéma de synthèse ci-après (cf. Figure IV.6). Cette analyse nous permet en fait de valider le modèle n°2.

##### Période d'étude globale du réseau de base

Pour la période d'étude globale du réseau de base du massif de la Cristallère qui se déroule entre le 1<sup>er</sup> octobre 2015 et le 3 juin 2016, nous constatons que :

- i) Le schéma de synthèse du modèle n°1 et du modèle n°2 pour cette période de 246 jours sont quasi-identiques (cf. Figure IV.6) à quelques différences près seulement au niveau des valeurs (valeurs altimétriques et valeurs planimétriques) ;
- ii) Les terrains de la zone du pied de versant ouest (point cible RB1), de la zone sommitale (points cibles RB2 et RB3) et de la zone sud du pied de versant est (point cible RB6) du massif de la Cristallère s'affaissent (cf. Figure IV.6) ;
- iii) Les terrains de la zone nord (point cible RB4) et de la zone centrale (point cible RB5) du pied de versant est du massif de la Cristallère se soulèvent (cf. Figure IV.6) ;
- iv) Au niveau du versant ouest du massif de la Cristallère, les terrains du pied de versant (point cible RB1) progressent tandis que les terrains de la partie sommitale (point cible RB3) reculent (cf. Figure IV.6) ;
- v) Au niveau du versant est du massif de la Cristallère, les terrains de la partie sommitale (point cible RB2), de la zone nord (point cible RB4) et de la zone centrale

(point cible RB5) du pied de versant est progressent tandis que les terrains de la zone sud du pied de versant (point cible RB6) reculent (cf. Figure IV.6).

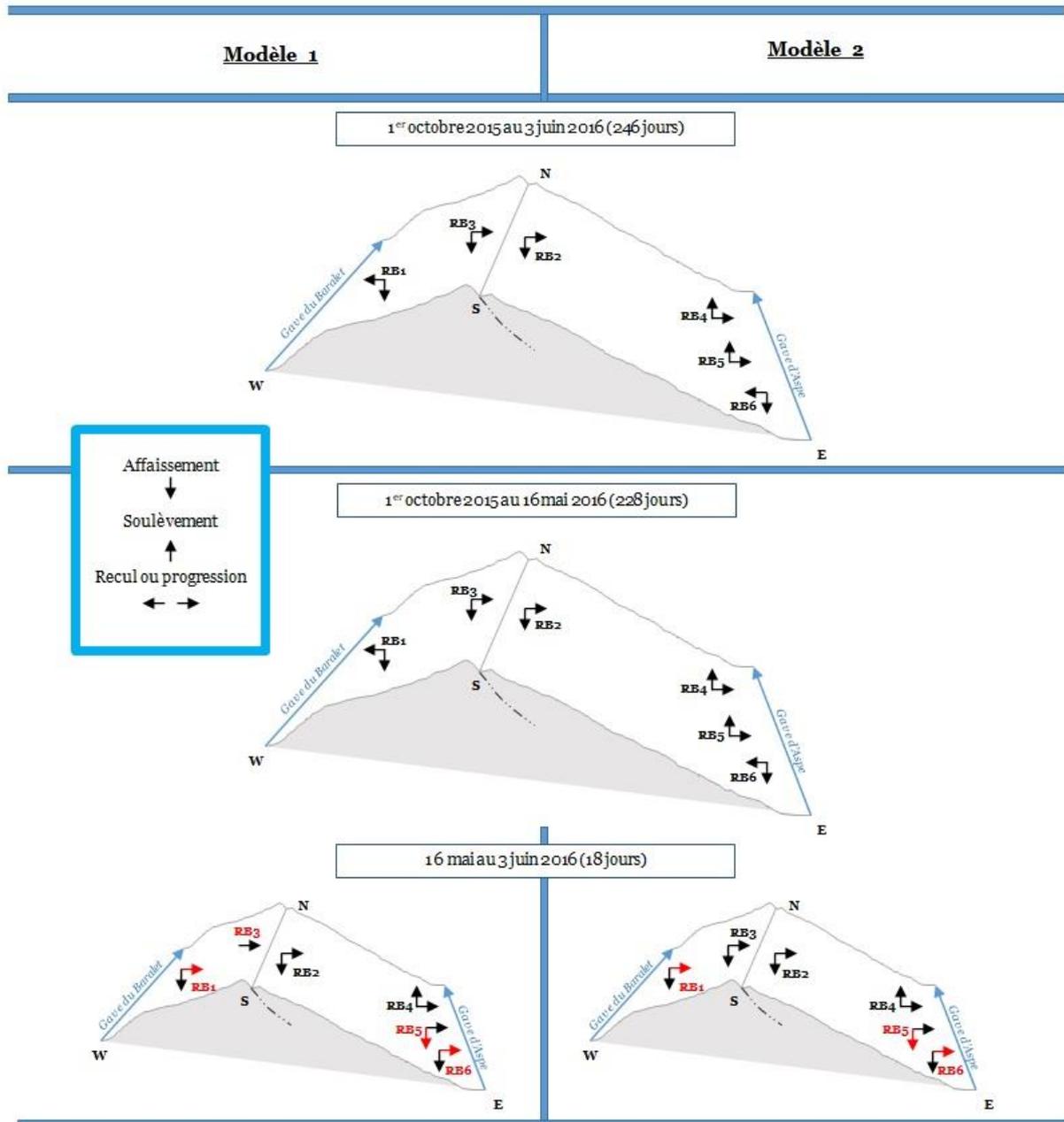


Figure IV.6. Schéma de synthèse de l'auscultation DGNSS (constellations GPS & GLONASS) du réseau de base du massif de la Cristallère : méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1) versus méthode de positionnement statique pivot PR (modèle n°2).

### Première partie de la période d'étude globale du réseau de base

Pour la première partie de la période d'étude globale du réseau de base du massif de la Cristallère qui se déroule entre le 1<sup>er</sup> octobre 2015 et le 16 mai 2016, nous constatons que :

- i) Le schéma de synthèse du modèle n°1 et du modèle n°2 pour cette période de 228 jours sont quasi-identiques (cf. Figure IV.6) à quelques différences près seulement au niveau des valeurs (valeurs altimétriques et valeurs planimétriques) ;
- ii) Les tendances d'évolution de cette période sont également identiques à celles de la période d'étude globale pour les 2 modèles (cf. Figure IV.6) ;

### Deuxième partie de la période d'étude globale du réseau de base

Pour la seconde partie de la période d'étude globale du réseau de base du massif de la Cristallère qui se déroule entre le 16 mai et le 3 juin 2016 (18 jours), nous constatons que :

- i) La seule différence qu'il y ait entre le schéma de synthèse du modèle n°1 et du modèle n°2 pour cette période se trouve au point cible RB3 (cf. Figure IV.6) puisque pour le modèle n°1, il n'y a pas d'affaissement ou de soulèvement alors que pour le modèle n°2, il y a un affaissement des terrains de la zone (cf. Figure IV.6) ;
- ii) Les tendances d'évolution de cette période sont différentes de celles de la période d'étude globale pour les 2 modèles (cf. Figure IV.6) ;
- iii) L'ensemble des terrains du versant ouest reculent ici tandis que l'ensemble des terrains du versant est progressent (cf. Figure IV.6).

## **b) Evolution minimale avérée du massif de la Cristallère**

Nous avons considéré jusqu'ici la position moyenne de chaque point cible sans tenir compte de l'incertitude (la précision). Si nous considérons les positions moyennes des points cibles RB et leurs précisions, nous ne pouvons pas avec le modèle n°1 (la méthode de positionnement multistations RGP) estimer de déplacement minimal avéré pour le massif de la Cristallère. Nous pouvons simplement annoncer une tendance. Cette méthode plébiscitée surtout par la communauté scientifique, n'est donc pas suffisante à cet endroit des Pyrénées.

En revanche, avec le modèle n°2 (la méthode de positionnement statique pivot PR), nous obtenons les données ci-après (cf. Figure IV.5). Nous pouvons estimer les déplacements minimaux avérés des points cibles et donc les vitesses annuelles minimales avérées d'évolution des zones environnantes. Nous constatons avec le modèle n°2 par exemple que les points cibles RB2 et RB3 situés dans la partie sommitale du massif de la Cristallère (points haut du DSL de la Cristallère) évoluent d'au moins 2 mm vers le sud entre le 1<sup>er</sup> octobre 2015 et le 3 juin 2016.

Le point cible RB2 évolue également d'au moins 6 mm vers l'est tandis que le point cible RB3 évolue d'au moins 4 mm vers l'est (cf. Figure IV.5).

Tableau IV.5. Modèle n°2 : estimation des déplacements minimaux avérés  $D_{min}$  (mm) et des vitesses annuelles minimales avérées d'évolution  $V_{min}$  (mm/an) au niveau des composantes est (E) et nord (N) reportées dans le système RGF93 Lambert 93 et de l'altitude NGF-IGN69 (Z). Direction principale d'évolution horizontale (ouest [W], nord [N], est [E] ou sud [S]). [n.s.p.] : pas d'estimation possible. Commentaires dans le texte.

Point cible		1er octobre 2015 au 3 juin 2016 (246 jours)		1er octobre 2015 au 16 mai 2016 (228 jours)		16 mai au 3 juin 2016 (18 jours)		Renvoi Annexe p. 211-222
		$D_{min}$ (mm)	$V_{min}$ (mm/an)	$D_{min}$ (mm)	$V_{min}$ (mm/an)	$D_{min}$ (mm)	$V_{min}$ (mm/an)	
RB1	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.4
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.5
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.6
RB2	E	6 E	9 E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.7
	N	2 S	3 S	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.8
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.9
RB3	E	4 E	6 E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.10
	N	2 S	3 S	2 S	3 S	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.11
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.12
RB4	E	7 E	10 E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.13
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.14
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.15
RB5	E	6 E	9 E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.16
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.17
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.18
RB6	E	n.s.p.	n.s.p.	7 W	11 W	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.19
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.20
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.21

#### IV.1.2 RESULTATS POUR LE RESEAU DE DETAIL N°1: LA PARTIE SOMMITALE DU DSL DE LA CRISTALLERE

Nous présentons et analysons ici les résultats obtenus à partir de l'auscultation DGNSS (constellations GPS & GLONASS) pour les 20 points cibles RDA du réseau de détail n°1 (RDA1 à RDA20). Ces points cibles sont positionnés de part et d'autre de l'accident majeur qui conditionne l'escarpement principal du DSL de la Cristallère au niveau de la partie sommitale du massif de la Cristallère ; l'altitude minimum est de 1769 m NGF au point cible RDA17 et l'altitude maximum est de 1882 m NGF au point cible RDA7. Les positions tridimensionnelles de ces points cibles ont été enregistrées le 30 octobre 2014, le 17 mai et le 7 juin 2016. La durée de l'étude globale du réseau de détail n°1 est ici de 586 jours.

Deux méthodes de positionnement par satellites ont été utilisées dans le cadre de cette étude pour ce réseau : la méthode de positionnement multistations RGP (cf. modèle n°1A) et la méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR (cf. modèle n°2A). Ces deux méthodes sont expliquées dans la partie méthodologie de ce manuscrit (cf. partie III.1).

Notons que les coordonnées tridimensionnelles des 20 points cibles RDA du réseau de détail n°1 figurent en annexe 1 (p. 223-261) pour chaque prise de mesure (le 30 octobre 2014, le 17 mai et le 7 juin 2016) et selon la méthode de positionnement utilisée (la méthode de positionnement multistations RGP ou la méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR). Nous y indiquons la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93, l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres, la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres à chaque fois. L'évolution en mètres de la composante est (E) et l'évolution de la composante nord (N) reportée dans le système RGF93 Lambert 93 en sus de l'évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) pour chaque point cible RDA du réseau de détail n°1 sont illustrées également en annexe 1 (p. 223-261).

Avant toute chose, nous remarquerons avec ces données de positionnement que pour le pic de la Cristallère (cf. Figure IV.7), nous obtenons une altitude différente de celle annoncée par l'IGN sur la carte topographique 1547 OT (Ossau, Vallée d'Aspe, Parc National des Pyrénées, échelle au 1/25000 ; IGN, 2017). Nous avons une différence de 6 m entre la position annoncée par l'IGN et l'altitude du point cible RDA7 qui le représente (cf. Annexe-Point RDA7 du réseau de détail n°1, p. 235). L'altitude du pic de la Cristallère serait donc de 1882 m NGF et non de 1876 m NGF. Deux hypothèses sont plausibles pour expliquer cette différence : soit il y a eu une erreur d'appréciation quant à sa valeur, soit le massif de la Cristallère s'est réellement surélevé de 6 m à cet endroit.

#### **IV.1.2.1 Modèle n°1A : Résultats avec la méthode de positionnement multistations RGP**

Dans ce modèle n°1A, le long de l'escarpement principal du DSL de la Cristallère, ont été mesurés les déplacements altimétriques et planimétriques des 20 points cibles RDA du réseau de détail n°1 avec la méthode de positionnement multistations RGP entre le 30 octobre 2014 et le 7 juin 2016 ; ils sont illustrés (cf. Figure IV.7) ci-après. Ces points cibles sont issus de la différence entre les positions moyennes de chaque prise de mesure.

L'ensemble de la partie sommitale du massif de la Cristallère à cet endroit s'affaisse pour l'ensemble de la période auscultée : nous avons enregistré pour tous les points cibles RDA des déplacements altimétriques négatifs sauf au point cible RDA11 entre le 17 mai et le 7 juin 2016 (cf. Figure IV.7).

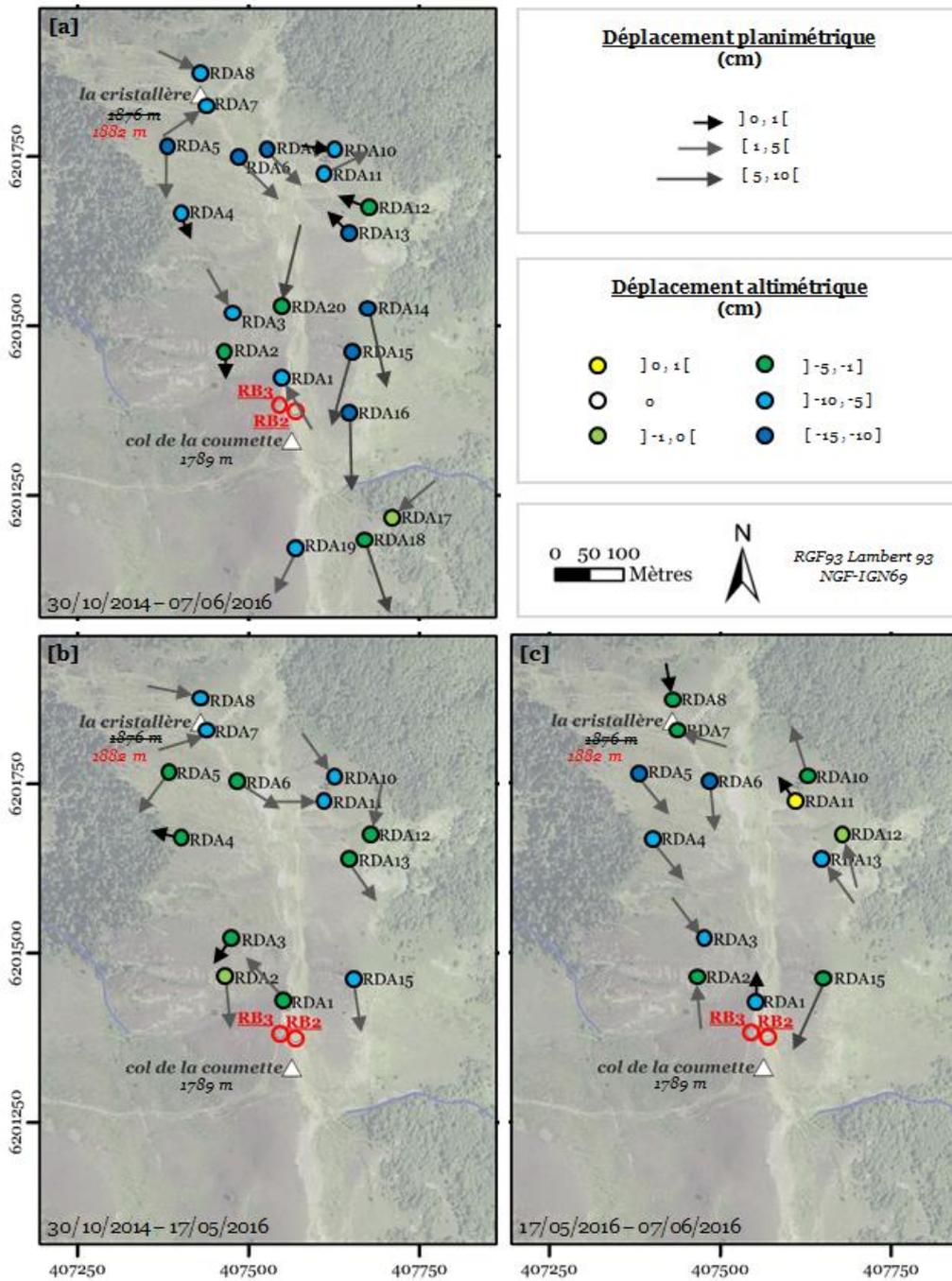


Figure IV.7. Déplacements altimétriques et planimétriques des points cibles RDA du réseau de détail n°1 mesurés avec la méthode de positionnement multistations RGP entre [a] le 30 octobre 2014 et le 7 juin 2016 ; [b] le 30 octobre 2014 et le 17 mai 2016 ; [c] le 17 mai et le 7 juin 2016. Les points cibles (RDA1 à RDA20) sont positionnés de part et d'autre de l'accident majeur qui conditionne l'escarpement principal du DSL de la Cristallère.

#### IV.1.2.2 Modèle n°2A : Résultats avec la méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR

Dans ce modèle n°2A, toujours le long de l'escarpement principal du DSL de la Cristallère, ont été mesurés les déplacements altimétriques et planimétriques de 13 points cibles RDA sur 20 du réseau de détail n°1 avec cette fois-ci la méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR entre le 17 mai et le 7 juin 2016 (période de 21 jours) ; ils sont illustrés (cf. Figure IV.8) ci-après. Ces points cibles sont issus de la différence entre les positions moyennes de ces deux prises de mesure.

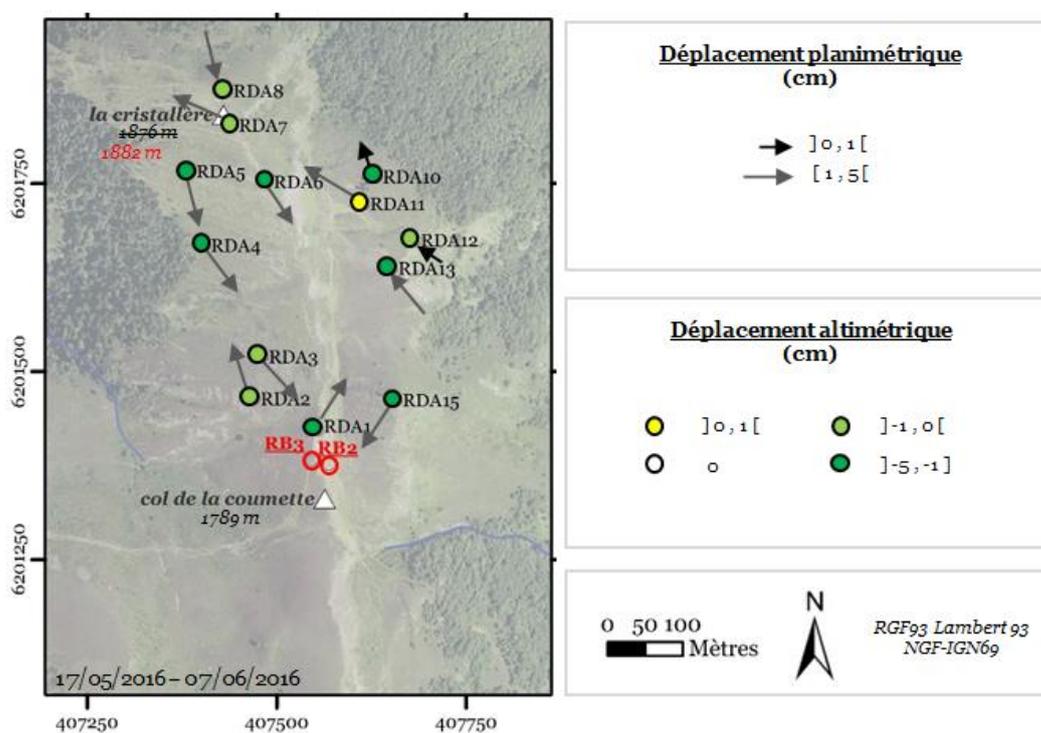


Figure IV.8. Déplacements altimétriques et planimétriques des points cibles RDA du réseau de détail n°1 mesurés avec la méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR entre le 17 mai et le 7 juin 2016 (21 jours). Les points cibles (RDA1 à RDA8, RDA10 à RDA13 et RDA15) sont positionnés de part et d'autre de l'accident majeur qui conditionne l'escarpement principal du DSL de la Cristallère.

Nous obtenons les mêmes conclusions que pour le modèle n°1A ; seules les valeurs altimétriques et planimétriques changent mais les tendances restent les mêmes.

### IV.1.2.3 Précisions altimétriques et planimétriques des points cibles RDA du réseau de détail n°1 : méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1A) versus méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR (modèle n°2A)

Nous avons ici exactement les mêmes conclusions que pour le réseau de base du massif de la Cristallère : les précisions altimétriques avec la méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR (modèle n°2A) sont bien meilleures qu'avec la méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1A).

#### a) Commentaires sur les précisions altimétriques (dV) des points cibles RDA

Avec la méthode de positionnement multistations RGP, la meilleure précision altimétrique que nous avons obtenue est de +/-4,6 cm le 17 mai 2016 au point cible RDA13 (cf. Tableau IV.6). La plus mauvaise précision altimétrique d'une valeur de +/-9,9 cm a été enregistrée le 30 octobre 2014 au point cible RDA19 (cf. Tableau IV.6). Le point cible RDA19 est en fait géographiquement le point cible le plus éloigné des stations RGP utilisées dans le cadre de cette étude avec cette méthode.

Tableau IV.6. Précisions altimétriques dV en centimètres des mesures moyennes des 20 points cibles RDA du réseau de détail n°1 : méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1A) versus méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR (modèle n°2A). [-] : pas de mesure.

Point cible	30 octobre 2014		17 mai 2016		7 juin 2016	
	Modèle n°1A	Modèle n°2A	Modèle n°1A	Modèle n°2A	Modèle n°1A	Modèle n°2A
RDA1	5	-	5,2	<b>1</b>	4,7	<b>1</b>
RDA2	5,1	-	5,7	<b>1</b>	5,3	<b>1</b>
RDA3	5,2	-	5,5	<b>1</b>	5,4	<b>1</b>
RDA4	5,3	-	5,2	<b>1</b>	5,2	<b>1</b>
RDA5	5,4	-	5,4	<b>1</b>	6	<b>1</b>
RDA6	5,2	-	4,9	<b>1</b>	5,2	<b>1</b>
RDA7	5,2	-	4,8	<b>1</b>	5,1	<b>1</b>
RDA8	6,5	-	4,8	<b>1</b>	5,3	<b>1</b>
RDA9	5,6	-	-	-	5,9	<b>1</b>
RDA10	5,7	-	5,2	<b>1</b>	5,2	<b>1</b>
RDA11	5,5	-	4,9	<b>1</b>	5,3	<b>1</b>
RDA12	5,4	-	5,5	<b>1</b>	5,2	<b>1</b>
RDA13	5,5	-	<b>4,6</b>	<b>1</b>	6,1	<b>1</b>
RDA14	5,6	-	-	-	5,9	<b>1</b>

Tableau IV.6 . (Suite)

<i>Point cible</i>	<i>30 octobre 2014</i>		<i>17 mai 2016</i>		<i>7 juin 2016</i>	
	Modèle n°1A	Modèle n°2A	Modèle n°1A	Modèle n°2A	Modèle n°1A	Modèle n°2A
<i>RDA14</i>	5,6	-	-	-	5,9	<b>1</b>
<i>RDA15</i>	5,5	-	<b>5,9</b>	<b>1</b>	5,3	<b>1</b>
<i>RDA16</i>	5,4	-	-	-	5,3	<b>1</b>
<i>RDA17</i>	5	-	-	-	6,1	<b>1</b>
<i>RDA18</i>	<b>4,9</b>	-	-	-	<b>6,9</b>	<b>1</b>
<i>RDA19</i>	<b>9,9</b>	-	-	-	6,2	<b>1</b>
<i>RDA20</i>	5,3	-	-	-	5,3	<b>1</b>
<i>Minimum</i>	<b>4,9</b>	-	<b>4,6</b>	<b>1</b>	<b>4,7</b>	<b>1</b>
<i>Maximum</i>	<b>9,9</b>	-	<b>5,9</b>	<b>1</b>	<b>6,9</b>	<b>1</b>
<i>Moyenne</i>	<b>5,6</b>	-	<b>5,2</b>	<b>1</b>	<b>5,5</b>	<b>1</b>

Avec la méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR, tous les points cibles relevés le 17 mai et le 7 juin 2016 affichent une précision altimétrique de +/-1 cm (cf. Tableau IV.6). Les points cibles sont géographiquement proches du pivot RB3-PR utilisé dans le cadre de cette étude avec cette méthode : précisions qu'ils se trouvent ici dans un rayon inférieur au kilomètre.

#### **b) Commentaires sur les précisions planimétriques (dH) des points cibles RDA**

Avec la méthode de positionnement multistations RGP, la meilleure précision planimétrique d'une valeur de +/-2,7 cm a été enregistrée le 7 juin 2016 au point cible RDA9 (cf. Tableau IV.7). La plus mauvaise précision planimétrique que nous avons obtenue est de +/-6,1 cm le 30 octobre 2014 au point cible RDA19 (cf. Tableau IV.7). Précisons d'ailleurs que la plus mauvaise précision altimétrique du réseau de détail n°1 a été relevée également à cet endroit avec cette méthode de positionnement (cf. partie précédente).

Avec la méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR, tous les points cibles relevés le 17 mai et le 7 juin 2016 affichent une précision planimétrique de +/-1 cm (cf. Tableau IV.7). Les points cibles sont géographiquement proches du pivot RB3-PR utilisé dans le cadre de cette étude avec cette méthode : précisions, comme dit précédemment (cf. partie précédente), qu'ils se trouvent dans un rayon inférieur au kilomètre.

Tableau IV.7. Précisions planimétriques dH en centimètres des mesures moyennes des 20 points cibles RDA du réseau de détail n°1 : méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1A) versus méthode de positionnement statique pivot RB3-PR (modèle n°2A). [-] : pas de mesure.

Point cible	30 octobre 2014		17 mai 2016		7 juin 2016	
	Modèle n°1A	Modèle n°2A	Modèle n°1A	Modèle n°2A	Modèle n°1A	Modèle n°2A
RDA1	3,6	-	3,2	<b>1</b>	3,1	<b>1</b>
RDA2	3,6	-	3,1	<b>1</b>	3,4	<b>1</b>
RDA3	3,6	-	3,2	<b>1</b>	3,3	<b>1</b>
RDA4	3,6	-	<b>3</b>	<b>1</b>	3,4	<b>1</b>
RDA5	3,6	-	3,2	<b>1</b>	3,6	<b>1</b>
RDA6	3,4	-	3,1	<b>1</b>	3,4	<b>1</b>
RDA7	3,3	-	3,4	<b>1</b>	3,3	<b>1</b>
RDA8	3,8	-	3,5	<b>1</b>	3,4	<b>1</b>
RDA9	3,1	-	-	-	<b>2,7</b>	<b>1</b>
RDA10	3,0	-	3,8	<b>1</b>	3	<b>1</b>
RDA11	2,9	-	3,8	<b>1</b>	3	<b>1</b>
RDA12	<b>2,8</b>	-	4,6	<b>1</b>	3,1	<b>1</b>
RDA13	<b>2,8</b>	-	4,3	<b>1</b>	4,3	<b>1</b>
RDA14	<b>2,8</b>	-	-	-	4,3	<b>1</b>
RDA15	<b>2,8</b>	-	<b>5</b>	<b>1</b>	4	<b>1</b>
RDA16	<b>2,8</b>	-	-	-	<b>4,5</b>	<b>1</b>
RDA17	2,9	-	-	-	3,8	<b>1</b>
RDA18	2,9	-	-	-	3,4	<b>1</b>
RDA19	<b>6,1</b>	-	-	-	3,6	<b>1</b>
RDA20	2,9	-	-	-	4	<b>1</b>
Minimum	<b>2,8</b>	-	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>2,7</b>	<b>1</b>
Maximum	<b>6,1</b>	-	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>4,5</b>	<b>1</b>
Moyenne	<b>3,3</b>	-	<b>3,6</b>	<b>1</b>	<b>3,5</b>	<b>1</b>

#### IV.1.2.4 Synthèse pour le réseau de détail n°1 : évolution minimale avérée du DSL de la Cristallère (partie sommitale)

Nous pouvons estimer comme pour le réseau de base les déplacements minimaux avérés des points cibles RDA et donc les vitesses annuelles minimales avérées d'évolution. Nous obtenons les valeurs suivantes présentées dans les tableaux ci-après avec la méthode de positionnement multistations RGP (modèle 1A) et avec la méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR (modèle 2A). Soulignons qu'avec cette deuxième méthode nous enregistrons une dynamique plus prononcée entre le 17 mai et le 7 juin 2016 ; le mois de mai 2016 est celui qui enregistre le plus de séismes pour la période d'étude (cf. partie II).

Tableau IV.8. Modèle n°1A : estimation des déplacements minimaux avérés  $D_{min}$  (mm) et des vitesses annuelles minimales avérées d'évolution  $V_{min}$  (mm/an) au niveau des composantes est (E) et nord (N) reportées dans le système RGF93 Lambert 93 et de l'altitude NGF-IGN69 (Z) de chaque point cible RDA selon la période d'étude entre le 30 octobre 2014 et le 7 juin 2016. Type d'évolution verticale : soulèvement [s] ou affaissement [a]. Direction principale d'évolution horizontale (ouest [W], nord [N], est [E] ou sud [S]). [n.s.p.] : pas d'estimation possible. [-] : pas de mesure. Les points cibles (RDA1 à RDA20) sont positionnés de part et d'autre de l'accident majeur qui conditionne l'escarpement principal du DSL de la Cristallère ; RDA2 à RDA5 dans la zone sommitale du versant ouest (\*), RDA9 à RDA18 dans la zone sommitale du versant est (\*\*), RDA1, RDA6 à RDA8, RDA19 et RDA20 sur la ligne de crête (\*\*\*) massif de la Cristallère.

Point cible	30 octobre 2014 au 7 juin 2016 (586 jours)		30 octobre 2014 au 17 mai 2016 (565 jours)		17 mai au 7 juin 2016 (21 jours)		Renvoi Annexe p. 223-262	
	$D_{min}$ (mm)	$V_{min}$ (mm/an)	$D_{min}$ (mm)	$V_{min}$ (mm/an)	$D_{min}$ (mm)	$V_{min}$ (mm/an)		
RDA1***	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.22	
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.23	
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.24	
RDA2*	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.25	
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.26	
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.27	
RDA3*	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.28	
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.29	
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.30	
RDA4*	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.31	
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.32	
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.33	
RDA5*	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.34	
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.35	
	Z	16 a	10 a	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.36
RDA6***	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.37	
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.38	
	Z	41 a	26 a	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.39
RDA7***	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.40	
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.41	
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.42
RDA8***	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.43	
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.44	
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.45
RDA9**	E	n.s.p.	n.s.p.	-	-	-	-	Figure A1.46
	N	n.s.p.	n.s.p.	-	-	-	-	Figure A1.47
	Z	12 a	7 a	-	-	-	-	Figure A1.48
RDA10**	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.49
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.50
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.51

Tableau IV.8. (Suite)

Point cible		30 octobre 2014 au 7 juin 2016 (586 jours)		30 octobre 2014 au 17 mai 2016 (565 jours)		17 mai au 7 juin 2016 (21 jours)		Renvoi Annexe p. 223-262
		D <sub>min</sub> (mm)	V <sub>min</sub> (mm/an)	D <sub>min</sub> (mm)	V <sub>min</sub> (mm/an)	D <sub>min</sub> (mm)	V <sub>min</sub> (mm/an)	
RDA11**	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.52
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.53
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.54
RDA12**	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.55
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.56
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.57
RDA13**	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.58
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.59
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.60
RDA14**	E	n.s.p.	n.s.p.	-	-	-	-	Figure A1.61
	N	<b>1 S</b>	<b>1 S</b>	-	-	-	-	Figure A1.62
	Z	<b>32 a</b>	<b>20 a</b>	-	-	-	-	Figure A1.63
RDA15**	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.64
	N	<b>23 S</b>	<b>14 S</b>	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.65
	Z	<b>12 a</b>	<b>7 a</b>	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.66
RDA16**	E	n.s.p.	n.s.p.	-	-	-	-	Figure A1.67
	N	<b>47 S</b>	<b>29 S</b>	-	-	-	-	Figure A1.68
	Z	<b>35 a</b>	<b>22 a</b>	-	-	-	-	Figure A1.69
RDA17**	E	n.s.p.	n.s.p.	-	-	-	-	Figure A1.70
	N	n.s.p.	n.s.p.	-	-	-	-	Figure A1.71
	Z	n.s.p.	n.s.p.	-	-	-	-	Figure A1.72
RDA18**	E	n.s.p.	n.s.p.	-	-	-	-	Figure A1.73
	N	<b>5 S</b>	<b>3 S</b>	-	-	-	-	Figure A1.74
	Z	n.s.p.	n.s.p.	-	-	-	-	Figure A1.75
RDA19***	E	n.s.p.	n.s.p.	-	-	-	-	Figure A1.76
	N	n.s.p.	n.s.p.	-	-	-	-	Figure A1.77
	Z	n.s.p.	n.s.p.	-	-	-	-	Figure A1.78
RDA20***	E	n.s.p.	n.s.p.	-	-	-	-	Figure A1.79
	N	<b>25 S</b>	<b>16 S</b>	-	-	-	-	Figure A1.80
	Z	n.s.p.	n.s.p.	-	-	-	-	Figure A1.81

Tableau IV.9. Modèle n°2A : estimation des déplacements avérés minimaux  $D_{min}$  (mm) et des vitesses annuelles minimales avérées d'évolution  $V_{min}$  (mm/an) au niveau des composantes est (E) et nord (N) reportées dans le système RGF93 Lambert 93 et de l'altitude NGF-IGN69 (Z) de chaque point cible RDA selon la période d'étude entre le 30 octobre 2014 et le 7 juin 2016. Type d'évolution verticale : soulèvement [s] ou affaissement [a]. Direction principale d'évolution horizontale (ouest [W], nord [N], est [E] ou sud [S]). [n.s.p.] : pas d'estimation possible. [-] : pas de mesure. Les points cibles (RDA1 à RDA20) sont positionnés de part et d'autre de l'accident majeur qui conditionne l'escarpement principal du DSL de la Cristallère ; RDA2 à RDA5 dans la zone sommitale du versant ouest (\*), RDA9 à RDA18 dans la zone sommitale du versant est (\*\*), RDA1, RDA6 à RDA8, RDA19 et RDA20 sur la ligne de crête (\*\*\*) du massif de la Cristallère.

Point cible		30 octobre 2014 au 7 juin 2016 (586 jours)		30 octobre 2014 au 17 mai 2016 (565 jours)		17 mai au 7 juin 2016 (21 jours)		Renvoi Annexe p. 223-262
		$D_{min}$ (mm)	$V_{min}$ (mm/an)	$D_{min}$ (mm)	$V_{min}$ (mm/an)	$D_{min}$ (mm)	$V_{min}$ (mm/an)	
RDA1***	E	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.22
	N	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.23
	Z	-	-	-	-	<b>3 a</b>	<b>52 a</b>	Figure A1.24
RDA2*	E	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.25
	N	-	-	-	-	<b>2 N</b>	<b>35 N</b>	Figure A1.26
	Z	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.27
RDA3*	E	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.28
	N	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.29
	Z	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.30
RDA4*	E	-	-	-	-	<b>1 E</b>	<b>17 E</b>	Figure A1.31
	N	-	-	-	-	<b>6 S</b>	<b>104 S</b>	Figure A1.32
	Z	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.33
RDA5*	E	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.34
	N	-	-	-	-	<b>2 S</b>	<b>35 S</b>	Figure A1.35
	Z	-	-	-	-	<b>4 a</b>	<b>70 a</b>	Figure A1.36
RDA6***	E	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.37
	N	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.38
	Z	-	-	-	-	<b>7 a</b>	<b>122 a</b>	Figure A1.39
RDA7***	E	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.40
	N	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.41
	Z	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.42
RDA8***	E	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.43
	N	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.44
	Z	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.45
RDA9**	E	-	-	-	-	-	-	Figure A1.46
	N	-	-	-	-	-	-	Figure A1.47
	Z	-	-	-	-	-	-	Figure A1.48
RDA10**	E	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.49
	N	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.50
	Z	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.51

Tableau IV.9. (Suite)

Point cible		30 octobre 2014 au 7 juin 2016 (586 jours)		30 octobre 2014 au 17 mai 2016 (565 jours)		17 mai au 7 juin 2016 (21 jours)		Renvoi Annexe p. 223-262
		D <sub>min</sub> (mm)	V <sub>min</sub> (mm/an)	D <sub>min</sub> (mm)	V <sub>min</sub> (mm/an)	D <sub>min</sub> (mm)	V <sub>min</sub> (mm/an)	
RDA11**	E	-	-	-	-	1 W	17 W	Figure A1.52
	N	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.53
	Z	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.54
RDA12**	E	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.55
	N	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.56
	Z	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.57
RDA13**	E	-	-	-	-	11 W	191 W	Figure A1.58
	N	-	-	-	-	16 N	278 N	Figure A1.59
	Z	-	-	-	-	17 a	295 a	Figure A1.60
RDA14**	E	-	-	-	-	-	-	Figure A1.61
	N	-	-	-	-	-	-	Figure A1.62
	Z	-	-	-	-	-	-	Figure A1.63
RDA15**	E	-	-	-	-	1 W	17 W	Figure A1.64
	N	-	-	-	-	9 S	156 S	Figure A1.65
	Z	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.66
RDA16**	E	-	-	-	-	-	-	Figure A1.67
	N	-	-	-	-	-	-	Figure A1.68
	Z	-	-	-	-	-	-	Figure A1.69
RDA17**	E	-	-	-	-	-	-	Figure A1.70
	N	-	-	-	-	-	-	Figure A1.71
	Z	-	-	-	-	-	-	Figure A1.72
RDA18**	E	-	-	-	-	-	-	Figure A1.73
	N	-	-	-	-	-	-	Figure A1.74
	Z	-	-	-	-	-	-	Figure A1.75
RDA19***	E	-	-	-	-	-	-	Figure A1.76
	N	-	-	-	-	-	-	Figure A1.77
	Z	-	-	-	-	-	-	Figure A1.78
RDA20***	E	-	-	-	-	-	-	Figure A1.79
	N	-	-	-	-	-	-	Figure A1.80
	Z	-	-	-	-	-	-	Figure A1.81

### **IV.1.3 RESULTATS POUR LE RESEAU DE DETAIL N°2 : BOURRELET FRONTAL DU DSL DE LA CRISTALLERE**

Nous présentons et analysons ici les résultats obtenus à partir de l'auscultation DGNSS (constellations GPS & GLONASS) pour les 22 points cibles RDB du réseau de détail n°2 (RDB1 à RDB22). Ces points cibles sont positionnés au niveau de la partie centrale du bourrelet frontal du DSL de la Cristallère dans le secteur du Bérat du haut (versant est du massif de la Cristallère) ; l'altitude minimum est de 878 m NGF au point cible RDB21 et l'altitude maximum est de 1167 m NGF au point cible RDB2.

Il y a deux parties pour ce réseau : une première partie où les points cibles RDB1 à RDB12 sont disposés en haut du bourrelet frontal (au niveau des granges de Labahut et des fermes Baringou et Lapédagne) et une deuxième partie, RDB13 à RDB22, où les points cibles sont disposés en partie basse du bourrelet frontal (depuis le pont Naudin qui surplombe le gave d'Aspe dans ce secteur vers les fermes Baringou et Lapédagne). Nous avons observé une partie des points de la partie haute du réseau pour la partie basse, RDB9 à RDB12, afin d'assurer un contrôle supplémentaire pour nos observations à cet endroit.

Pour la partie haute de ce réseau, les positions tridimensionnelles de ces points cibles ont été enregistrées le 9 janvier 2015, le 20 mai et le 9 juin 2016 ; la durée de l'étude globale de cette première partie du réseau de détail n°2 est ici de 517 jours. Pour la partie basse de ce réseau, les positions tridimensionnelles de ces points cibles ont été enregistrées le 8 octobre 2015, le 20 mai et le 9 juin 2016 ; la durée de l'étude globale de cette deuxième partie du réseau de détail n°2 est ici plus courte que précédemment, elle est de 245 jours.

Deux méthodes de positionnement par satellites ont été utilisées dans le cadre de cette étude pour ce réseau : la méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1B) comme pour le réseau de base (modèle n°1 ; cf. partie IV.1.1.1) et comme pour le réseau de détail n°1 (modèle n°1A ; cf. partie IV.1.2.1) ; la méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR (modèle n°2B) dans le même esprit que pour le réseau de détail n°1 (modèle n°2A ; cf. partie IV.1.2.2). Ces deux méthodes sont expliquées dans la partie méthodologie de ce manuscrit.

Notons que les coordonnées tridimensionnelles des 22 points cibles RDB du réseau de détail n°2 figurent en annexe 1 (p. 263-305) pour chaque prise de mesure (le 9 janvier et le 8 octobre 2015, le 20 mai et le 9 juin 2016) et selon la méthode de positionnement utilisée (la méthode de positionnement multistations RGP ou la méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR). Nous y indiquons la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93, l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres, la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres à chaque fois. L'évolution en mètres de la composante est (E) et l'évolution de la composante nord (N)

reportée dans le système RFG93 Lambert 93 en sus de l'évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) pour chaque point cible RDB du réseau de détail n°2 sont illustrées également en annexe 1 (p. 263-305).

#### **IV.1.3.1 Modèle n°1B : Résultats avec la méthode de positionnement multistations RGP**

Dans ce modèle n°1B, au niveau du bourrelet frontal DSL de la Cristallère, ont été mesurés les déplacements altimétriques et planimétriques des 22 points cibles RDB du réseau de détail n°2 avec la méthode de positionnement multistations RGP. Ces points cibles sont issus de la différence entre les positions moyennes de chaque prise de mesure.

##### **a) Partie haute du bourrelet frontal du DSL de la Cristallère (partie 1)**

Pour la partie haute du bourrelet frontal du DSL de la Cristallère, nous avons obtenu avec la méthode de positionnement multistations RGP, entre le 9 janvier 2015 et le 9 juin 2016 (période d'une durée de 517 jours), les informations et les données suivantes (cf. Figure IV.9).

##### **b) Partie basse du bourrelet frontal du DSL de la Cristallère (partie 2)**

Pour la partie basse du bourrelet frontal du DSL de la Cristallère, nous avons obtenu avec la méthode de positionnement multistations RGP, entre le 8 octobre 2015 et le 9 juin 2016 (période d'une durée de 245 jours), les informations et les données suivantes (cf. Figure IV.10).

#### **IV.1.3.2 Modèle n°2B : Résultats avec la méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR**

Dans ce modèle n°2B, toujours au niveau du bourrelet frontal du DSL de la Cristallère, ont été mesurés les déplacements altimétriques et planimétriques des 22 points cibles RDB du réseau de détail n°2 avec la méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR. Ces points cibles sont issus de la différence entre les positions moyennes de chaque prise de mesure.

##### **a) Partie haute du bourrelet frontal du DSL de la Cristallère (partie 1)**

Pour la partie haute du bourrelet frontal du DSL de la Cristallère, nous avons obtenu avec la méthode de de positionnement statique rapide pivot RB5-PR, entre le 20 mai et le 9 juin 2016 (période d'une durée de 20 jours), les informations et les données suivantes (cf. Figure IV.11). Nous obtenons les mêmes conclusions que pour le modèle n°2B ; seules les valeurs altimétriques et planimétriques changent mais les tendances restent les mêmes.

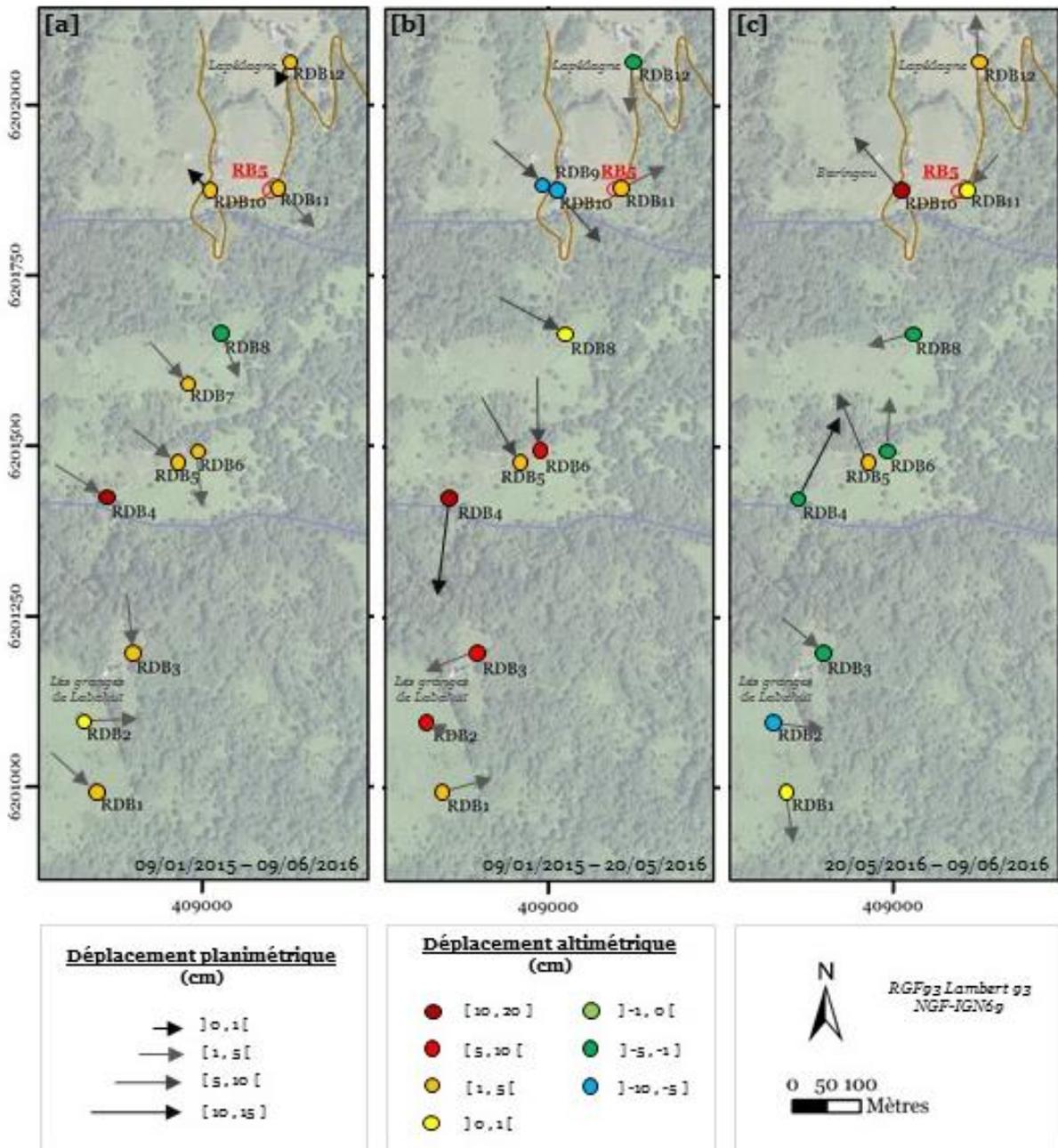


Figure IV.9. Déplacements altimétriques et planimétriques des points cibles RDB du réseau de détail n°2 (partie 1 ; partie haute du bourrelet frontal du DSL de la Cristallère) mesurés avec la méthode de positionnement multistations RGP entre [a] le 9 janvier 2015 et le 9 juin 2016 ; [b] le 9 janvier 2015 et le 20 mai 2016 ; [c] le 20 mai et le 9 juin 2016.

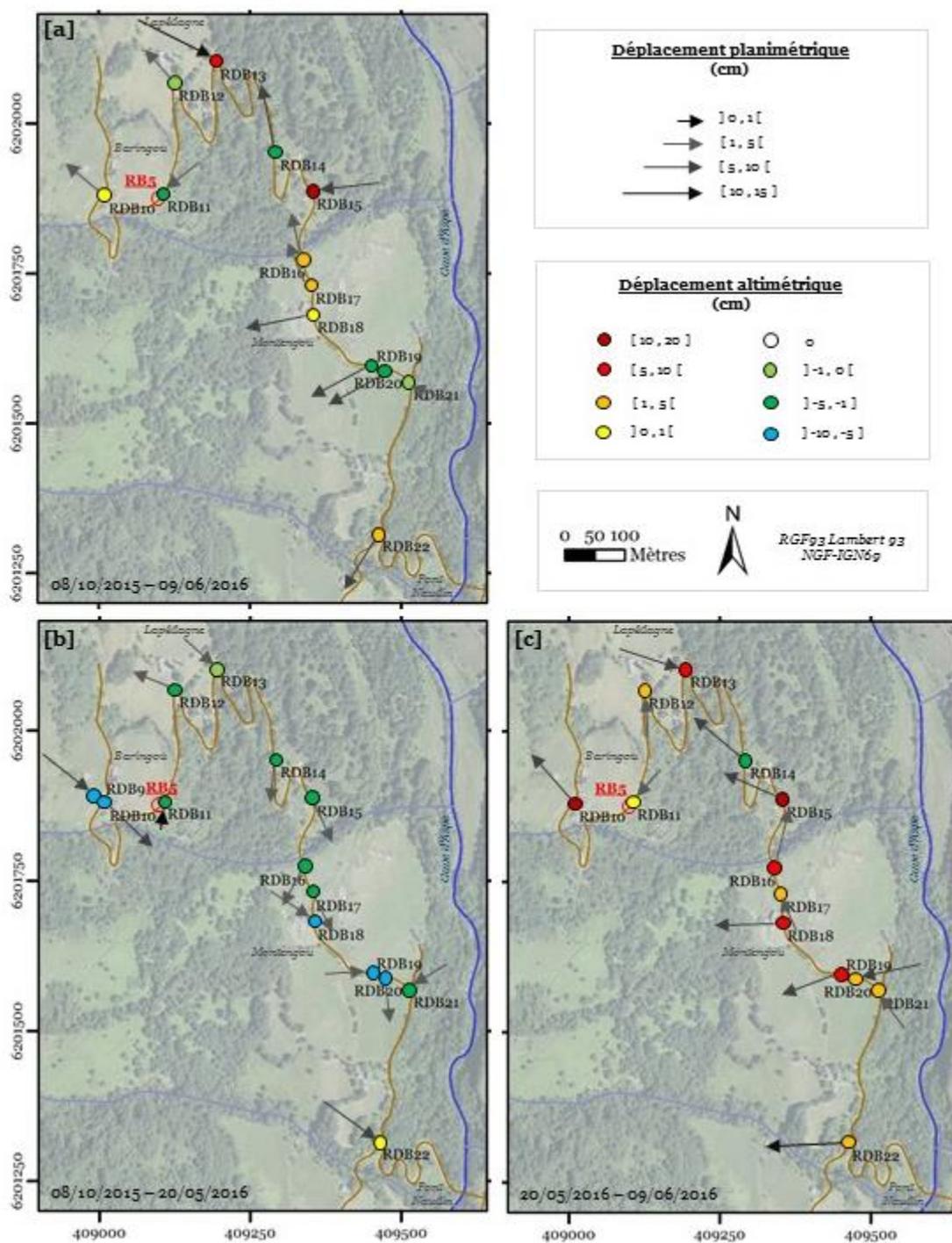


Figure IV.10. Déplacements altimétriques et planimétriques des points cibles RDB du réseau de détail n°2 (partie 2 ; partie basse du bourrelet frontal du DSL de la Cristallère) mesurés avec la méthode de positionnement multistations RGP entre [a] le 8 octobre 2015 et le 9 juin 2016 ; [b] le 8 octobre 2015 et le 20 mai 2016 ; [c] le 20 mai et le 9 juin 2016.

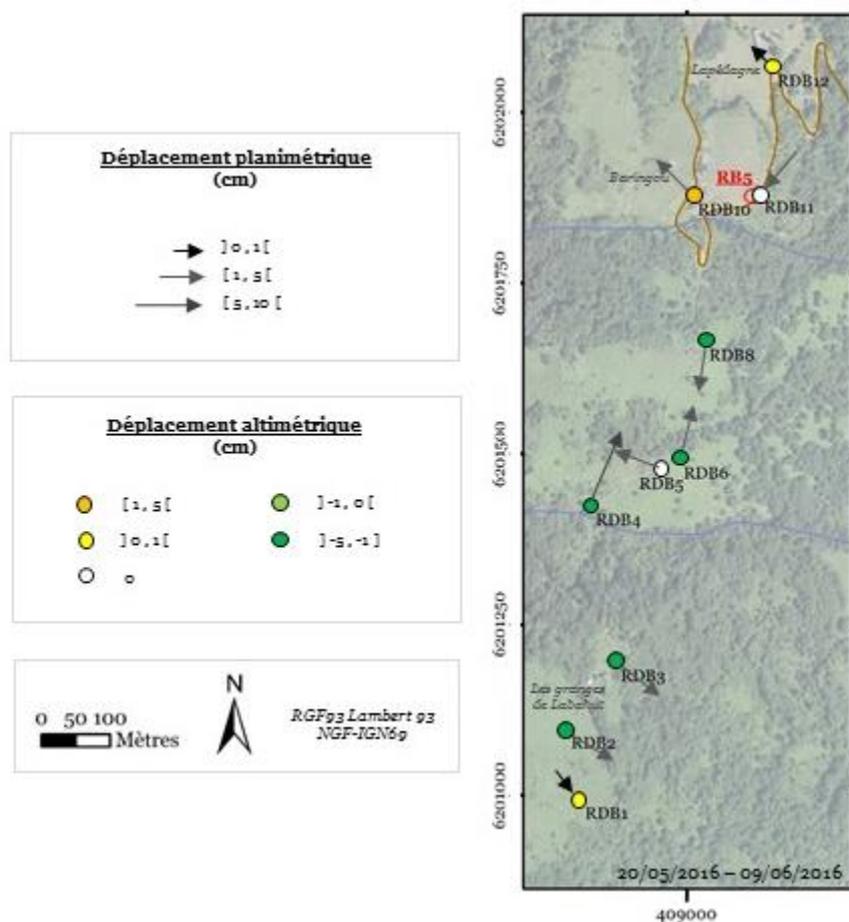


Figure IV.11. Déplacements altimétriques et planimétriques des points cibles RDB du réseau de détail n°2 (partie 1 ; partie haute du bourrelet frontal du DSL de la Cristallère) mesurés avec la méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR entre le 20 mai et le 9 juin 2016.

#### a) Partie basse du bourrelet frontal du DSL de la Cristallère (partie 2)

Pour la partie basse du bourrelet frontal du DSL de la Cristallère, nous avons obtenu avec la méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR, entre le 8 octobre 2015 et le 9 juin 2016 (période d'une durée de 245 jours), les informations et les données suivantes (cf. Figure IV.12). Nous obtenons les mêmes conclusions que pour le modèle n°2B ; seules les valeurs altimétriques et planimétriques changent mais les tendances restent les mêmes.

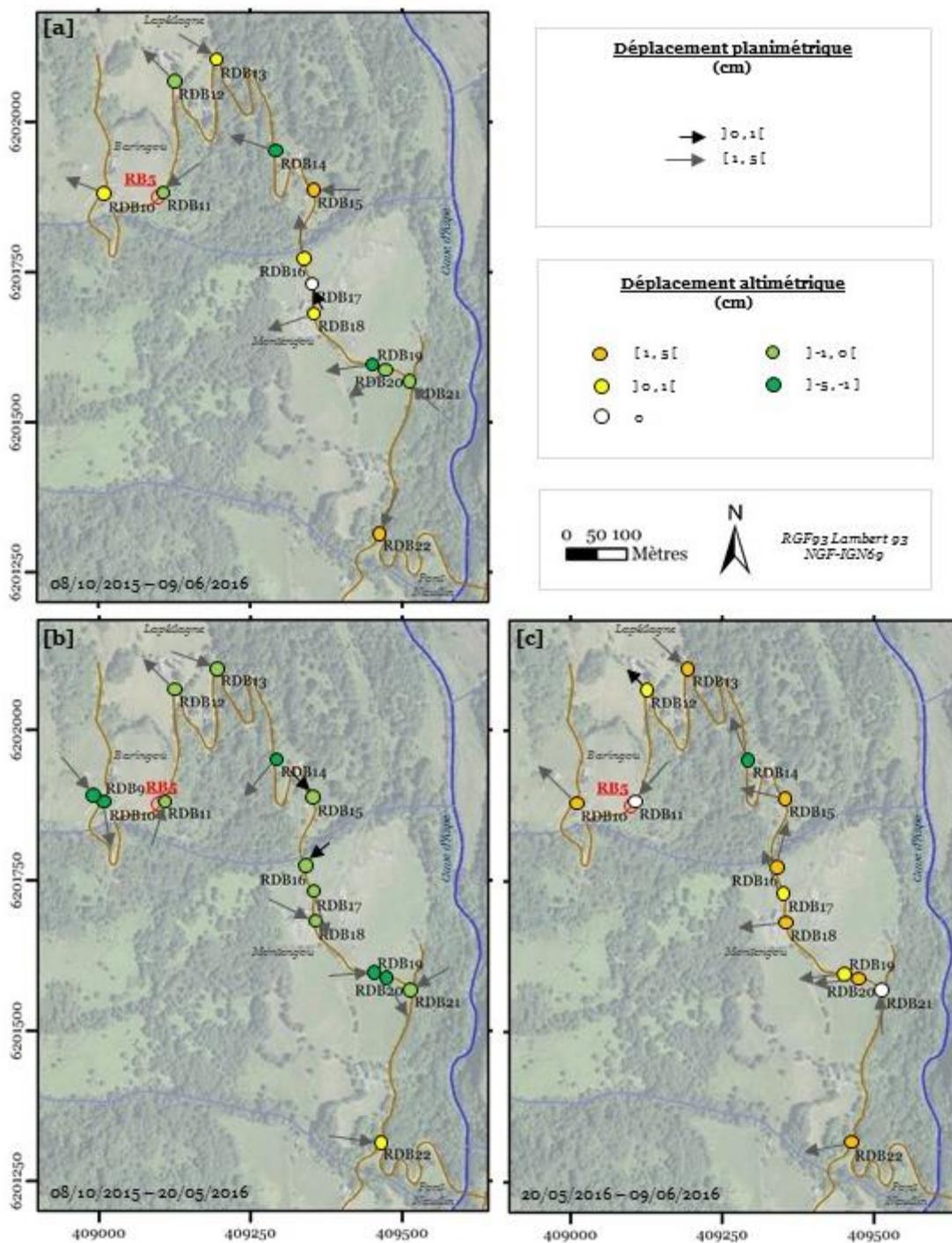


Figure IV.12. Déplacements altimétriques et planimétriques des points cibles RDB du réseau de détail n°2 (partie 2 ; partie basse du bourrelet frontal du DSL de la Cristallère) mesurés avec la méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR entre [a] le 8 octobre 2015 et le 9 juin 2016 ; [b] le 8 octobre 2015 et le 20 mai 2016 ; [c] le 20 mai et le 9 juin 2016.

#### **IV.1.3.3 Précisions altimétriques et planimétriques des points cibles RDB du réseau de détail n°2 (burrelet frontal du DSL de la Cristallère) : méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1B) versus méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR (modèle n°2B)**

Nous avons ici exactement les mêmes conclusions que pour le réseau de base et le réseau de détail n°1 du massif de la Cristallère : les précisions altimétriques avec la méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR (modèle n°2B) sont bien meilleures qu'avec la méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1B).

##### **a) Commentaires sur les précisions altimétriques (dV) des points cibles RDB du réseau de détail n°2 (burrelet frontal du DSL de la Cristallère)**

Avec la méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1B), la meilleure précision altimétrique que nous avons obtenue est de +/-4,4 cm le 8 octobre 2015 au point cible RDB21 (Tableau IV.10). La plus mauvaise précision altimétrique d'une valeur de +/-20,2 cm a été enregistrée le 9 juin 2016 au point cible RDB22 (Tableau IV.10). C'est le point cible le plus éloigné géographiquement des stations RGP utilisées dans le cadre de cette étude avec cette méthode. Remarquons également que les points cibles RDB13 et RDB14 ne sont pas les points cibles les plus éloignés géographiquement des stations RGP utilisées dans le cadre de cette étude avec cette méthode, mais qu'ils affichent une précision altimétrique nettement supérieure aux autres points cibles avec par exemple 12,8 cm le 20 mai 2016 pour RDB13 ou encore 17,6 cm le 8 octobre 2015 pour RDB14 (Tableau IV.10). En fait, nous sommes à cet endroit dans une zone boisée ; la précision altimétrique de ces points cibles est influencée par le couvert végétal.

Avec la méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR (modèle n°2B), la meilleure précision altimétrique que nous avons obtenue est de +/-1 cm pour 5 points cibles RDB sur 13 le 8 octobre 2015, pour 4 points cibles RDB sur 21 le 20 mai 2016 et pour 4 points cibles RDB sur 22 le 9 juin 2016 (Tableau IV.10). La plus mauvaise précision altimétrique d'une valeur de +/-3 cm a été enregistrée le 9 juin 2016 au point cible RDB22 (Tableau IV.10). Le point cible RDB22 est géographiquement le point le plus éloigné du pivot RB5-PR utilisé dans le cadre de cette étude avec cette méthode ; précisons qu'il se situe également dans une zone boisée.

Tableau IV.10. Précisions altimétriques dV en centimètres des mesures moyennes des 22 points cibles RDB du réseau de détail n°2 du site expérimental : méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1B) versus méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR (modèle n°2B). [-] : pas de mesure.

Point cible	9 janvier 2015		8 octobre 2015		20 mai 2016		9 juin 2016	
	Modèle n°1B	Modèle n°2B	Modèle n°1B	Modèle n°2B	Modèle n°1B	Modèle n°2B	Modèle n°1B	Modèle n°2B
RDB1	5,3	-	-	-	5,9	1,2	5,1	1,2
RDB2	6,1	-	-	-	7,2	1,3	6	1,3
RDB3	5,2	-	-	-	6,2	1,3	5,7	1,3
RDB4	5,9	-	-	-	7,7	1,2	6,2	1,2
RDB5	6,4	-	-	-	7,1	1,1	5,6	1,1
RDB6	5,6	-	-	-	6,4	1,1	5,3	1,1
RDB7	6,1	-	-	-	-	-	6,8	1,2
RDB8	6,5	-	-	-	8,1	1,2	10,3	1,2
RDB9	6,8	-	-	-	5,4	1	7,2	1
RDB10	6,4	-	5,5	1	7,4	1	6,3	1
RDB11	6,5	-	5,2	1	4,9	1	4,8	1
RDB12	5,6	-	6,1	1	5,7	1	5,6	1
RDB13	-	-	12,4	1,7	12,8	2,1	18,5	2,1
RDB14	-	-	17,6	1,7	7,7	1,7	11,9	1,7
RDB15	-	-	5,8	1,3	10,2	1,8	5,9	1,8
RDB16	-	-	5,3	1,1	8,6	1,4	5	1,4
RDB17	-	-	5,3	1,1	8,4	1,3	4,9	1,3
RDB18	-	-	5,5	1,1	7,9	1,3	7	1,3
RDB19	-	-	4,9	1	8	1,3	7,3	1,3
RDB20	-	-	4,5	1,1	5,3	1,2	7,5	1,2
RDB21	-	-	4,4	1	5,9	1,4	7,1	1,4
RDB22	-	-	8,9	1,3	11,2	2	20,2	3
Minimum	5,2	-	4,4	1	4,9	1	4,8	1
Maximum	6,8	-	17,6	1,7	12,8	2,1	20,2	3
Moyenne	6	-	7	1,2	7,5	1,3	7,7	1,4

### b) Commentaires sur les précisions planimétriques (dH) des points cibles RDB du réseau de détail n°2 (burrelet frontal du DSL de la Cristallère)

Avec la méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1B), la meilleure précision planimétrique d'une valeur de +/-2,7 cm a été enregistrée le 20 mai 2016 au point cible RDB20 (Tableau IV.11). La plus mauvaise précision planimétrique que nous avons obtenue est de +/-10 cm le 8 octobre 2015 au point cible RDB14 et le 9 juin 2016 au point cible RDB13 (Tableau IV.11). Notons que ces deux derniers points cibles ne sont pas les points cibles

les plus éloignés géographiquement des stations RGP utilisées dans le cadre de cette étude avec cette méthode, mais nous nous situons à cet endroit dans une zone boisée ; la précision planimétrique de ces points cibles est influencée par le couvert végétal.

Tableau IV.11. Précisions planimétriques dH en centimètres des mesures moyennes des 22 points cibles RDB du réseau de détail n°2 du site expérimental : méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1B) versus méthode de positionnement statique pivot RB5-PR (modèle n°2B). [-] : pas de mesure.

Point cible	9 janvier 2015		8 octobre 2015		20 mai 2016		9 juin 2016	
	Modèle n°1B	Modèle n°2B	Modèle n°1B	Modèle n°2B	Modèle n°1B	Modèle n°2B	Modèle n°1B	Modèle n°2B
RDB1	3	-	-	-	2,9	<b>1</b>	3,4	<b>1</b>
RDB2	3,4	-	-	-	3,2	<b>1</b>	3,6	<b>1</b>
RDB3	<b>2,9</b>	-	-	-	3,4	<b>1</b>	3,8	<b>1</b>
RDB4	3,4	-	-	-	5,1	<b>1</b>	4,6	<b>1</b>
RDB5	<b>3,7</b>	-	-	-	5,1	<b>1</b>	3,6	<b>1</b>
RDB6	3	-	-	-	4,6	<b>1</b>	3,6	<b>1</b>
RDB7	3,2	-	-	-	-	-	3,7	<b>1</b>
RDB8	3,3	-	-	-	4,3	<b>1</b>	4,5	<b>1</b>
RDB9	3,3	-	-	-	3,8	<b>1</b>	3,3	<b>1</b>
RDB10	3,3	-	3,8	<b>1</b>	3,8	<b>1</b>	<b>2,8</b>	<b>1</b>
RDB11	3,5	-	2,9	<b>1</b>	4,9	<b>1</b>	2,9	<b>1</b>
RDB12	3,4	-	4,5	<b>1</b>	3,8	<b>1</b>	3,4	<b>1</b>
RDB13	-	-	7,5	<b>1</b>	<b>9,7</b>	<b>1,3</b>	<b>10</b>	<b>1,3</b>
RDB14	-	-	<b>10</b>	<b>1</b>	4,2	<b>1</b>	5,6	<b>1</b>
RDB15	-	-	<b>2,8</b>	<b>1</b>	4,2	<b>1</b>	3,8	<b>1</b>
RDB16	-	-	3	<b>1</b>	3,5	<b>1</b>	3,9	<b>1</b>
RDB17	-	-	3,1	<b>1</b>	3,2	<b>1</b>	3,8	<b>1</b>
RDB18	-	-	3	<b>1</b>	2,9	<b>1</b>	5,1	<b>1</b>
RDB19	-	-	2,9	<b>1</b>	3	<b>1</b>	4,3	<b>1</b>
RDB20	-	-	3	<b>1</b>	<b>2,7</b>	<b>1</b>	4,1	<b>1</b>
RDB21	-	-	3	<b>1</b>	2,8	<b>1</b>	4,5	<b>1</b>
RDB22	-	-	4,9	<b>1</b>	6,6	1,2	8,7	<b>1,3</b>
Minimum	<b>2,9</b>	-	<b>2,8</b>	<b>1</b>	<b>2,7</b>	<b>1</b>	<b>2,8</b>	<b>1</b>
Maximum	<b>3,7</b>	-	<b>10</b>	<b>1</b>	<b>9,7</b>	<b>1,3</b>	<b>10</b>	<b>1,3</b>
Moyenne	<b>3,3</b>	-	<b>4,2</b>	<b>1</b>	<b>4,2</b>	<b>1</b>	<b>4,4</b>	<b>1</b>

Avec la méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR (modèle n°2B), la meilleure précision planimétrique d'une valeur de +/-1 cm a été enregistrée le 8 octobre 2015, le 20 mai et le 9 juin 2016 pour la plupart des points cibles RDB (Tableau IV.11). La plus mauvaise précision planimétrique que nous avons obtenue est de +/-1,3 cm le 20 mai au point

cible RDB13 et le 9 juin 2016 aux points cibles RDB13 et RDB22 (Tableau IV.11). Bien que le point cible RDB22 soit le point cible le plus éloigné du pivot RB5-PR utilisé dans le cadre de cette étude avec cette méthode, ce n'est pas ce seul facteur qui explique cette précision planimétrique plus faible que les autres points cibles RDB. Rappelons que les points cibles RDB13 et RDB22 sont situés tous les deux dans une zone boisée ; comme dit précédemment (cf. § précédent), la précision planimétrique des points cibles est influencée par le couvert végétal.

#### **IV.1.3.4 Synthèse pour le réseau de détail n°2 : évolution minimale avérée du DSL de la Cristallère (bourrelet frontal)**

Nous pouvons estimer comme pour les deux autres réseaux les déplacements minimaux avérés des points cibles RDB et donc les vitesses annuelles minimales avérées d'évolution. Nous obtenons les valeurs suivantes présentés dans les tableaux ci-après avec la méthode de positionnement multistations RGP (modèle 1B) et avec la méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR (modèle 2B).

Tableau IV.12. Modèle n°1B - Partie 1 du réseau de détail n°2 : estimation des déplacements minimaux avérés  $D_{\min}$  (mm) et des vitesses annuelles minimales avérées d'évolution  $V_{\min}$  (mm/an) au niveau des composantes est (E) et nord (N) reportées dans le système RGF93 Lambert 93 et de l'altitude NGF-IGN69 (Z) de chaque point cible RDB (RDB1 à RDB12) selon la période d'étude entre le 9 janvier 2015 et le 9 juin 2016. Type d'évolution verticale : soulèvement [s] ou affaissement [a]. Direction principale d'évolution horizontale (ouest [W], nord [N], est [E] ou sud [S]). [n.s.p.] : pas d'estimation possible. [-] : pas de mesure.

Point cible		9 janvier 2015 au 9 juin 2016 (517 jours)		9 janvier 2015 au 20 mai 2016 (497 jours)		20 mai au 9 juin 2016 (20 jours)		Renvoi Annexe p. 263-286
		$D_{\min}$ (mm)	$V_{\min}$ (mm/an)	$D_{\min}$ (mm)	$V_{\min}$ (mm/an)	$D_{\min}$ (mm)	$V_{\min}$ (mm/an)	
RDB1	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.82
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.83
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.84
RDB2	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.85
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.86
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.87
RDB3	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.88
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.89
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.90
RDB4	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.91
	N	n.s.p.	n.s.p.	<b>82 S</b>	<b>60 S</b>	<b>48 N</b>	<b>876 N</b>	Figure A1.92
	Z	<b>3 s</b>	<b>2 s</b>	<b>22 s</b>	<b>16 s</b>	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.93
RDB5	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.94
	N	n.s.p.	n.s.p.	<b>3 S</b>	<b>2 S</b>	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.95
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.96
RDB6	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.97
	N	n.s.p.	n.s.p.	<b>22 S</b>	<b>16 S</b>	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.98
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.99
RDB7	E	n.s.p.	n.s.p.	-	-	-	-	Figure A1.100
	N	n.s.p.	n.s.p.	-	-	-	-	Figure A1.101
	Z	n.s.p.	n.s.p.	-	-	-	-	Figure A1.102
RDB8	E	n.s.p.	n.s.p.	<b>9 E</b>	<b>7 E</b>	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.103
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.104
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.105
RDB9	E	-	-	<b>3 E</b>	<b>2 E</b>	-	-	Figure A1.106
	N	-	-	n.s.p.	n.s.p.	-	-	Figure A1.107
	Z	-	-	n.s.p.	n.s.p.	-	-	Figure A1.108
RDB10	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	<b>4 W</b>	<b>73 W</b>	Figure A1.109
	N	n.s.p.	n.s.p.	<b>2 S</b>	<b>1 S</b>	<b>11 N</b>	<b>201 N</b>	Figure A1.110
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.111
RDB11	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.112
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.113
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.114
RDB12	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.115
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.116
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.117

Tableau IV.13. Modèle n°2B - Partie 1 du réseau de détail n°2 : estimation des déplacements minimaux avérés  $D_{\min}$  (mm) et des vitesses annuelles minimales d'évolution avérées  $V_{\min}$  (mm/an) au niveau des composantes est (E) et nord (N) reportées dans le système RGF93 Lambert 93 et de l'altitude NGF-IGN69 (Z) de chaque point cible RDB (RDB1 à RDB12) selon la période d'étude entre le 9 janvier 2015 et le 9 juin 2016. Type d'évolution verticale : soulèvement [s] ou affaissement [a]. Direction principale d'évolution horizontale (ouest [W], nord [N], est [E] ou sud [S]). [n.s.p.] : pas d'estimation possible. [-] : pas de mesure.

Point cible		9 janvier 2015 au 9 juin 2016 (517 jours)		9 janvier 2015 au 20 mai 2016 (497 jours)		20 mai au 9 juin 2016 (20 jours)		Renvoi Annexe p. 263-286
		$D_{\min}$ (mm)	$V_{\min}$ (mm/an)	$D_{\min}$ (mm)	$V_{\min}$ (mm/an)	$D_{\min}$ (mm)	$V_{\min}$ (mm/an)	
RDB1	E	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.82
	N	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.83
	Z	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.84
RDB2	E	-	-	-	-	<b>9 E</b>	<b>164 E</b>	Figure A1.85
	N	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.86
	Z	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.87
RDB3	E	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.88
	N	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.89
	Z	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.90
RDB4	E	-	-	-	-	<b>10 E</b>	<b>183 E</b>	Figure A1.91
	N	-	-	-	-	<b>42 N</b>	<b>767 N</b>	Figure A1.92
	Z	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.93
RDB5	E	-	-	-	-	<b>2 W</b>	<b>37 W</b>	Figure A1.94
	N	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.95
	Z	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.96
RDB6	E	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.97
	N	-	-	-	-	<b>2 N</b>	<b>37 N</b>	Figure A1.98
	Z	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.99
RDB7	E	-	-	-	-	-	-	Figure A1.100
	N	-	-	-	-	-	-	Figure A1.101
	Z	-	-	-	-	-	-	Figure A1.102
RDB8	E	-	-	-	-	<b>12 W</b>	<b>219 W</b>	Figure A1.103
	N	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.104
	Z	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.105
RDB9	E	-	-	-	-	-	-	Figure A1.106
	N	-	-	-	-	-	-	Figure A1.107
	Z	-	-	-	-	-	-	Figure A1.108
RDB10	E	-	-	-	-	<b>12 W</b>	<b>219 W</b>	Figure A1.109
	N	-	-	-	-	<b>12 N</b>	<b>219 N</b>	Figure A1.110
	Z	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.111
RDB11	E	-	-	-	-	<b>3 W</b>	<b>55 W</b>	Figure A1.112
	N	-	-	-	-	<b>6 S</b>	<b>110 S</b>	Figure A1.113
	Z	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.114
RDB12	E	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.115
	N	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.116
	Z	-	-	-	-	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.117

Tableau IV.14. Modèle n°1B - Partie 2 du réseau de détail n°2 (méthode de positionnement multistations RGP) : estimation des déplacements minimaux avérés  $D_{\min}$  (mm) et des vitesses annuelles minimales avérées d'évolution  $V_{\min}$  (mm/an) au niveau des composantes est (E) et nord (N) reportées dans le système RGF93 Lambert 93 et de l'altitude NGF-IGN69 (Z) de chaque point cible RDB (RDB9 à RDB22) selon la période d'étude entre le 8 octobre 2015 et le 9 juin 2016. Type d'évolution verticale : soulèvement [s] ou affaissement [a]. Direction principale d'évolution horizontale (ouest [W], nord [N], est [E] ou sud [S]). [n.s.p.] : pas d'estimation possible. [-] : pas de mesure.

Point cible		8 octobre 2015 au 9 juin 2016 (245 jours)		8 octobre 2015 au 20 mai 2016 (225 jours)		20 mai au 9 juin 2016 (20 jours)		Renvoi Annexe p. 279-286
		$D_{\min}$ (mm)	$V_{\min}$ (mm/an)	$D_{\min}$ (mm)	$V_{\min}$ (mm/an)	$D_{\min}$ (mm)	$V_{\min}$ (mm/an)	
RDB9	E	-	-	n.s.p.	n.s.p.	-	-	Figure A1.106
	N	-	-	n.s.p.	n.s.p.	-	-	Figure A1.107
	Z	-	-	n.s.p.	n.s.p.	-	-	Figure A1.108
RDB10	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	4 W	73 W	Figure A1.109
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	11 N	201 N	Figure A1.110
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.111
RDB11	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.112
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.113
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.114
RDB12	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.115
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.116
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.117
RDB13	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.118
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.119
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.120
RDB14	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.121
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.122
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.123
RDB15	E	14 W	21 W	n.s.p.	n.s.p.	23 W	420 W	Figure A1.124
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.125
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.126
RDB16	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.127
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.128
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.129
RDB17	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.130
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.131
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.132
RDB18	E	12 W	18 W	n.s.p.	n.s.p.	32 W	584 W	Figure A1.133
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.134
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.135
RDB19	E	5 W	7 W	n.s.p.	n.s.p.	32 W	584 W	Figure A1.136
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.137
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.138

Tableau IV.14. (Suite)

<i>Point cible</i>		<b>8 octobre 2015 au 9 juin 2016 (245 jours)</b>		<b>8 octobre 2015 au 20 mai 2016 (225 jours)</b>		<b>20 mai au 9 juin 2016 (20 jours)</b>		<b>Renvoi Annexe p. 279-286</b>
		<b>D<sub>min</sub> (mm)</b>	<b>V<sub>min</sub> (mm/an)</b>	<b>D<sub>min</sub> (mm)</b>	<b>V<sub>min</sub> (mm/an)</b>	<b>D<sub>min</sub> (mm)</b>	<b>V<sub>min</sub> (mm/an)</b>	
<i>RDB20</i>	E	6 W	9 W	n.s.p.	n.s.p.	10 W	183 W	Figure A1.139
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.140
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.141
<i>RDB21</i>	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.142
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.143
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.144
<i>RDB22</i>	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	4 W	73 W	Figure A1.145
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.146
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.147

Tableau IV.15. Modèle n°2B - Partie 2 du réseau de détail n°2 (méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR) : estimation des déplacements minimaux avérés  $D_{\min}$  (mm) et des vitesses annuelles minimales avérées d'évolution  $V_{\min}$  (mm/an) au niveau des composantes est (E) et nord (N) reportées dans le système RGF93 Lambert 93 et de l'altitude NGF-IGN69 (Z) de chaque point cible RDB (RDB9 à RDB22) selon la période d'étude entre le 8 octobre 2015 et le 9 juin 2016. Type d'évolution verticale : soulèvement [s] ou affaissement [a]. Direction principale d'évolution horizontale (ouest [W], nord [N], est [E] ou sud [S]). [n.s.p.] : pas d'estimation possible. [-] : pas de mesure.

Point cible		8 octobre 2015 au 9 juin 2016 (245 jours)		8 octobre 2015 au 20 mai 2016 (225 jours)		20 mai au 9 juin 2016 (20 jours)		Renvoi Annexe p. 279-286
		$D_{\min}$ (mm)	$V_{\min}$ (mm/an)	$D_{\min}$ (mm)	$V_{\min}$ (mm/an)	$D_{\min}$ (mm)	$V_{\min}$ (mm/an)	
RDB9	E	-	-	7 E	11 E	-	-	Figure A1.106
	N	-	-	11 S	18 S	-	-	Figure A1.107
	Z	-	-	n.s.p.	n.s.p.	-	-	Figure A1.108
RDB10	E	9 W	13 W	n.s.p.	n.s.p.	12 W	219 W	Figure A1.109
	N	n.s.p.	n.s.p.	3 S	5 S	12 N	219 N	Figure A1.110
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.111
RDB11	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	3 W	55 W	Figure A1.112
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	6 S	110 S	Figure A1.113
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.114
RDB12	E	1 W	1 W	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.115
	N	1 N	1 N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.116
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.117
RDB13	E	15 E	22 E	1 E	2 E	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.118
	N	3 S	4 S	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.119
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.120
RDB14	E	1 W	1 W	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.121
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	2 N	37 N	Figure A1.122
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.123
RDB15	E	6 W	9 W	n.s.p.	n.s.p.	12 W	219 W	Figure A1.124
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.125
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.126
RDB16	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.127
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	2 N	37 N	Figure A1.128
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.129
RDB17	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.130
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	2 N	37 N	Figure A1.131
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.132
RDB18	E	12 W	18 W	n.s.p.	n.s.p.	22 W	402 W	Figure A1.133
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.134
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.135
RDB19	E	7 W	10 W	n.s.p.	n.s.p.	19 W	347 W	Figure A1.136
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.137
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.138

Tableau IV.15. (Suite)

<i>Point cible</i>		<i>8 octobre 2015 au 9 juin 2016 (245 jours)</i>		<i>8 octobre 2015 au 20 mai 2016 (225 jours)</i>		<i>20 mai au 9 juin 2016 (20 jours)</i>		<i>Renvoi Annexe p. 279-286</i>
		<i>D<sub>min</sub> (mm)</i>	<i>V<sub>min</sub> (mm/an)</i>	<i>D<sub>min</sub> (mm)</i>	<i>V<sub>min</sub> (mm/an)</i>	<i>D<sub>min</sub> (mm)</i>	<i>V<sub>min</sub> (mm/an)</i>	
<i>RDB20</i>	E	<b>13 W</b>	<b>19 W</b>	n.s.p.	n.s.p.	<b>22 W</b>	<b>402 W</b>	Figure A1.139
	N	<b>5 S</b>	<b>7 S</b>	<b>1S</b>	<b>2 S</b>	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.140
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.141
<i>RDB21</i>	E	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.142
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	<b>2 N</b>	<b>37 N</b>	Figure A1.143
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.144
<i>RDB22</i>	E	n.s.p.	n.s.p.	<b>12 E</b>	<b>19 E</b>	<b>14 W</b>	<b>256 W</b>	Figure A1.145
	N	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.146
	Z	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	n.s.p.	Figure A1.147



## IV.2 RESULTATS COMMENTES DES OBSERVATIONS AERIENNES AVEC UN DRONE TYPE AILE VOLANTE RGB

3 campagnes d'observations aériennes (soit 7508 prises de vues) ont été réalisées dans le cadre de cette étude avec un drone du type aile volante : une 1re campagne à l'automne 2014, une 2e campagne à l'automne 2015 et une 3e campagne au printemps 2016 (cf. Tableau IV.16).

Tableau IV.16. Date d'acquisition et nombre de photos géolocalisées obtenues pour chaque vol effectué sur le massif de la Cristallère pour les campagnes 2014, 2015 et 2016.

<i>Campagne</i>	<i>Numéro de vol</i>	<i>Date d'acquisition</i>	<i>Nombre de photos géolocalisées</i>
2014	2014_V1	01/11/2014	114
	2014_V2	01/11/2014	144
2015	2015_V1	15/10/2015	462
	2015_V2	15/10/2015	344
	2015_V3	16/10/2015	350
	2015_V4	16/10/2015	351
	2015_V5	16/10/2015	142
	2015_V6	16/10/2015	348
	2015_V7	16/10/2015	330
	2015_V8	16/10/2015	342
	2015_V9	22/10/2015	326
	2015_V10	22/10/2015	336
	2015_V11	23/10/2015	331
	2015_V12	23/10/2015	187
	2015_V13	24/10/2015	328
	2015_V14	23/10/2015	232
	2015_V15	23/10/2015	44
	2015_V16	23/10/2015	22
	2015_V17	23/10//2015	157
	2015_V18	24/10/2015	175
	2015_V19	24/10/2015	188
	2015_V20	24/10/2015	177
	2015_V21	14/11/2015	259
	2015_V22	14/11/2015	258
	2015_V23	14/11/2015	263
	2015_V24	14/11/2015	301
	2015_V25	15/11/2015	172
	2015_V26	15/11/2015	179
	2015_V27	15/11/2015	257
	2015_V28	15/11/2015	180
2016	2016_V1	07/06/2016	96
	2016_V2	08/06/2016	113

#### IV.2.1 CAMPAGNE AUTOMNE 2014 : LA PARTIE SOMMITALE DU DSL DE LA CRISTALLERE

2 vols ont été effectués à l'automne 2014, le 1er novembre (cf. Tableau IV.16) : le vol « 2014\_v1 » au niveau de la double crête du DSL de la Cristallère et le vol « 2014\_v2 » au niveau de la partie active de ce DSL (la Pène du Thès).

Nous avons obtenu à l'issue de l'acquisition 258 prises de vues géolocalisées pour l'ensemble de cette campagne soit respectivement 114 photos pour « 2014\_v1 » et 144 photos pour « 2014\_v2 » (cf. Tableau IV.16). Les précisions des prises de vues avant optimisation pour la campagne 2014 sont indiquées dans le tableau ci-après (cf. Tableau IV.17).

Tableau IV.17. Précisions en mètres des prises de vues avant optimisation pour la campagne 2014 : précision horizontale (XY) et précision verticale (Z).

<i>Précision</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Médiame</i>
<i>XY (m)</i>	4,46	5,49	4,98	5,17
<i>Z (m)</i>	3,21	4,12	3,67	3,71

Le traitement initial de ces vols (l'étape 1) a été réalisé séparément : 2 sous-projets ont été créés. Nous avons obtenu les caractéristiques suivantes pour les 2 sous-projets (cf. Tableau IV.18). Toutes les images ont été calibrées et retenues ; précisons que l'optimisation de la caméra correspond à la différence relative entre les paramètres de caméra initiale et optimisée. Le GSD est de 11,37 cm/pixel pour le premier vol et de 10,79 cm/pixel pour le deuxième vol.

Tableau IV.18. Caractéristiques des sous-projets du traitement de la campagne 2014.

<i>Numéro de vol</i>	<i>Date d'acquisition</i>	<i>Nombre de photos calibrées</i>	<i>Optimisation de la caméra (%)</i>	<i>GSD (cm/pixel)</i>
<i>2014_V1</i>	01/11/2014	114 (100%)	2,4	11,37
<i>2014_V2</i>	01/11/2014	144 (100%)	2,36	10,79

Les 2 sous-projets ont ensuite été fusionnés. Les points cibles RDA du réseau de détail n°1, les points d'accroche entre les 2 vols, des points de contrôles avec la campagne complète de 2015 ont été rajoutés. L'étape initiale du projet fusionné a été optimisée.

Nous obtenons pour la campagne 2014 à l'issue du traitement, un nuage de points 3D de 34.844.233 points qui assure une couverture d'environ 3,3 km<sup>2</sup> (cf. Figure IV.13). 258 images calibrées soit 100% des images calibrées pour les 2 vols ont été utilisées pour réaliser ce modèle 3D. L'optimisation de la caméra est de 2,37%. Le GSD moyen est de 10,96 cm/pixel.

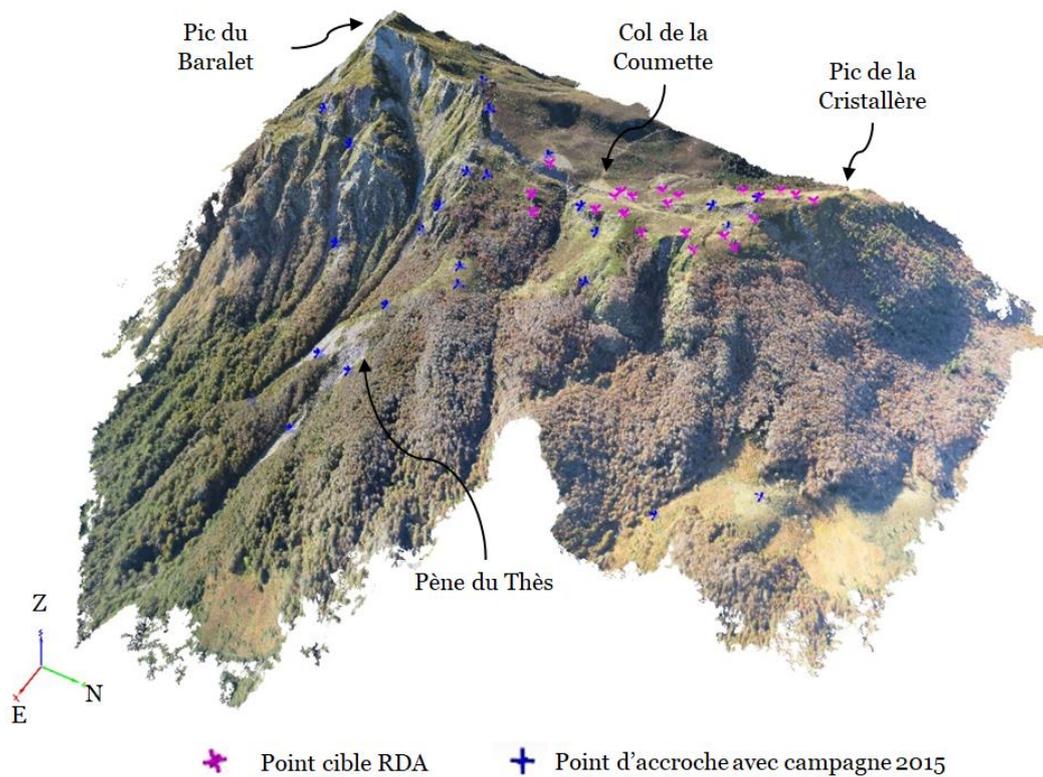


Figure IV.13. Nuage de points 3D texturé complet au niveau de la partie sommitale du DSL de la Cristallère avec sa zone la plus active (la Pène du Thès). Résultat obtenu à partir du traitement des vols « 2014\_v1 » et « 2014\_v2 ».

#### IV.2.2 CAMPAGNE AUTOMNE 2015 : L'ENSEMBLE DU MASSIF DE LA CRISTALLERE

28 vols ont été effectués à l'automne 2015 pour assurer une couverture de l'ensemble du massif de la Cristallère. Ces vols ont été réalisés sur plusieurs jours entre le 15 octobre et le 15 novembre (cf. Tableau IV.16).

Nous avons obtenu à l'issue de l'acquisition 7041 prises de vues géolocalisées pour l'ensemble de cette campagne (cf. Tableau IV.16). Les précisions des prises de vues avant optimisation pour la campagne 2015 sont indiquées dans le tableau ci-après (cf. Tableau IV.19).

Le traitement initial de ces vols (l'étape 1) a été réalisé séparément comme pour la campagne 2014. Nous avons obtenu les caractéristiques suivantes pour les 28 sous-projets (cf. Tableau IV.20). Toutes les images n'ont pas été calibrées et retenues ; une partie des photos de

« 2015\_V15 » a été rejetée. Le GSD minimum est de 5,67 cm/pixel pour « 2015\_V26 » et le GSD maximum est de 14,75 cm/pixel pour « 2015\_V28 » (cf. Tableau IV.20).

Tableau IV.19. Précisions en mètres des prises de vues avant optimisation pour la campagne 2015 : précision horizontale (XY) et précision verticale (Z).

<i>Précision</i>	<i>Minimum</i>	<i>Maximum</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Médiane</i>
<i>XY (m)</i>	3,55	7,30	4,32	4,31
<i>Z (m)</i>	2,46	7,69	3,40	3,31

Tableau IV.20. Caractéristiques des sous-projets du traitement de la campagne 2015.

<i>Numéro de vol</i>	<i>Date d'acquisition</i>	<i>Nombre de photos calibrées</i>	<i>Optimisation de la caméra (%)</i>	<i>GSD (cm/pixel)</i>
2015_V1	15/10/2015	452 (97%)	2,35	6,09
2015_V2	15/10/2015	344 (100%)	2,31	6,12
2015_V3	16/10/2015	348 (99%)	2,32	8,7
2015_V4	16/10/2015	351 (100%)	2,38	8,39
2015_V5	16/10/2015	141 (99%)	2,31	12,31
2015_V6	16/10/2015	347 (99%)	2,39	8,62
2015_V7	16/10/2015	323 (97%)	2,36	10,35
2015_V8	16/10/2015	338 (98%)	2,38	7,03
2015_V9	22/10/2015	314 (96%)	2,34	8,7
2015_V10	22/10/2015	269 (95%)	2,35	8,3
2015_V11	23/10/2015	330 (99%)	2,3	10,55
2015_V12	23/10/2015	187 (100%)	2,4	9,92
2015_V13	24/10/2015	327 (99%)	2,38	8,12
2015_V14	23/10/2015	132 (100%)	2,35	10,36
2015_V15	23/10/2015	23 (113%)*	2,33	7,51
2015_V16	23/10/2015	21 (95%)	2,57	9,57
2015_V17	23/10//2015	155 (98%)	2,38	8,17
2015_V18	24/10/2015	175 (100%)	2,32	10,65
2015_V19	24/10/2015	166 (98%)	2,29	6,97
2015_V20	24/10/2015	173 (97%)	2,4	8,21
2015_V21	14/11/2015	259 (100%)	2,3	9,01
2015_V22	14/11/2015	258 (100%)	2,26	8,32
2015_V23	14/11/2015	263 (100%)	2,27	7,79
2015_V24	14/11/2015	284 (94%)	2,33	8,98
2015_V25	15/11/2015	172 (100%)	2,29	6,26
2015_V26	15/11/2015	178 (99%)	2,26	5,67
2015_V27	15/11/2015	246 (95%)	2,19	13,75
2015_V28	15/11/2015	145 (100%)	2,12	14,75

Les 28 sous-projets ont ensuite été fusionnés. Les points cibles RB du réseau de base, les points cibles RDA du réseau de détail n°1, les points cibles RDB du réseau de détail n°2, les points d'accroche entre les 28 vols, des points de contrôles avec les campagnes de 2014 et de 2016 ont été rajoutés. L'étape initiale du projet fusionné a été optimisée.

Nous obtenons pour la campagne 2015 à l'issue du traitement, un nuage de points 3D de 8.310.085.146 points qui assure une couverture de l'ensemble du massif de la Cristallère soit près de 23 km<sup>2</sup> (cf. Figure IV.14). 6721 photos calibrées ont été retenues pour réaliser ce modèle 3D. L'optimisation de la caméra est de 2,33%. Le GSD moyen est de 8,31 cm/pixel.

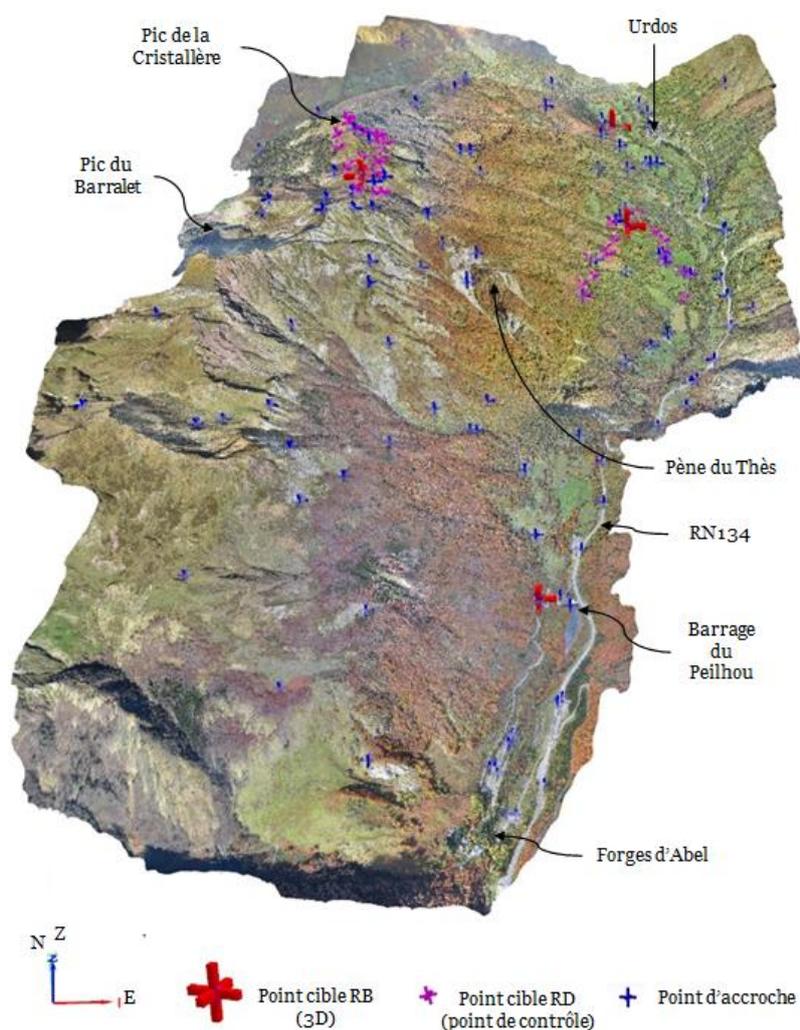


Figure IV.14. Nuage de points 3D texturé complet de l'ensemble du massif de la Cristallère pour la campagne 2015.

Précisons que 5 des points cibles RB (RB2 à RB6) du réseau de base rajouté comme points GCP dans ce projet, affichent une erreur moyenne de positionnement inférieure au cm pour les composantes X et Y et la composante Z.

Par exemple, pour le point cible RB3 illustré ci-dessous (cf. Figure IV.15), l'erreur moyenne de positionnement est inférieure au cm pour les composantes X et Y mais de - 1,7 cm pour la composante Z.

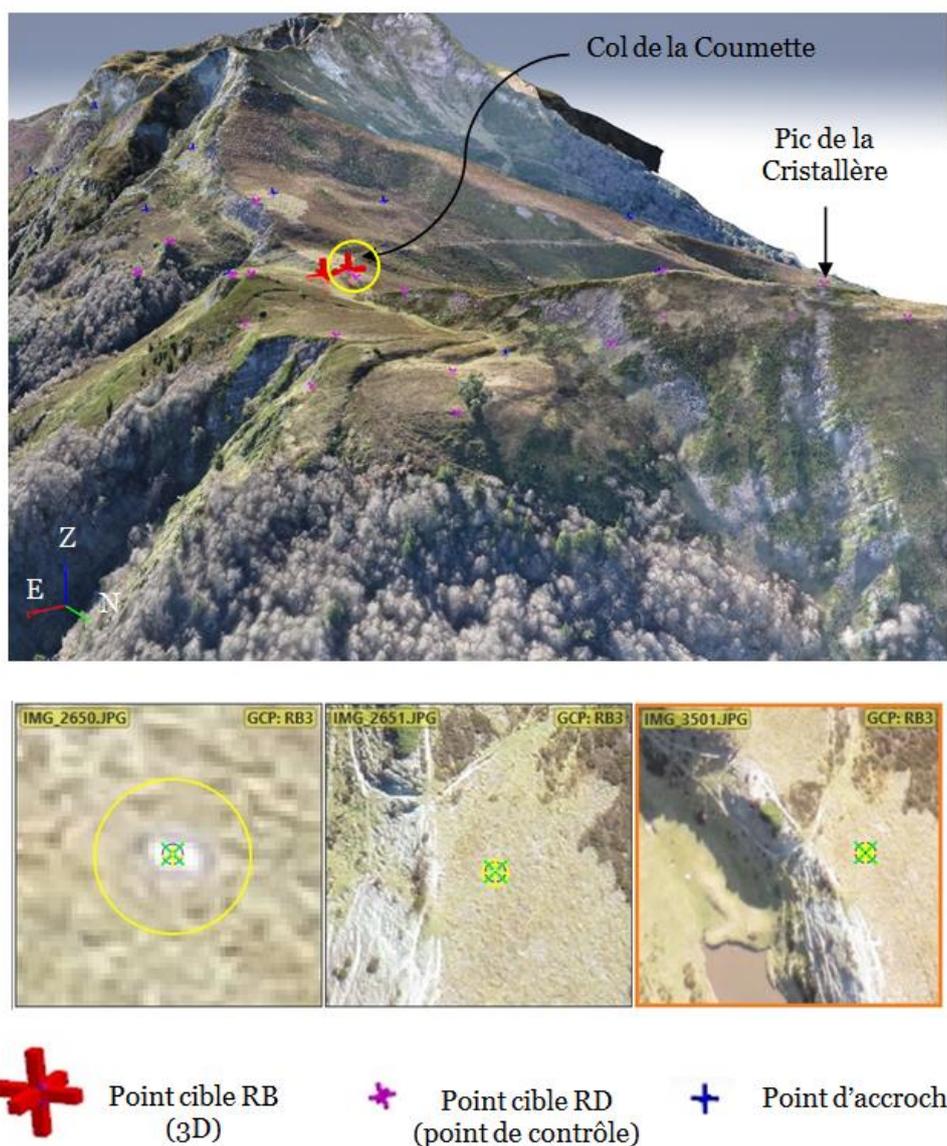


Figure IV.15. Exemple de point GCP pour la campagne 2015 : le point cible RB3 du réseau de base.

Rajoutons que les points cibles RD des deux réseaux de détails du massif de la Cristallère (points de contrôle du projet), affichent une erreur moyenne de positionnement de - 12 cm pour la composante X, 18 cm pour la composante Y et -84 cm pour la composante Z.

Par exemple, pour le points cible RDB17 illustré ci-dessous (cf. Figure IV.16), l'erreur moyenne de positionnement est de -10 cm pour la composante X, de 18 cm pour la composante Y et de - 62 cm pour la composante Z.

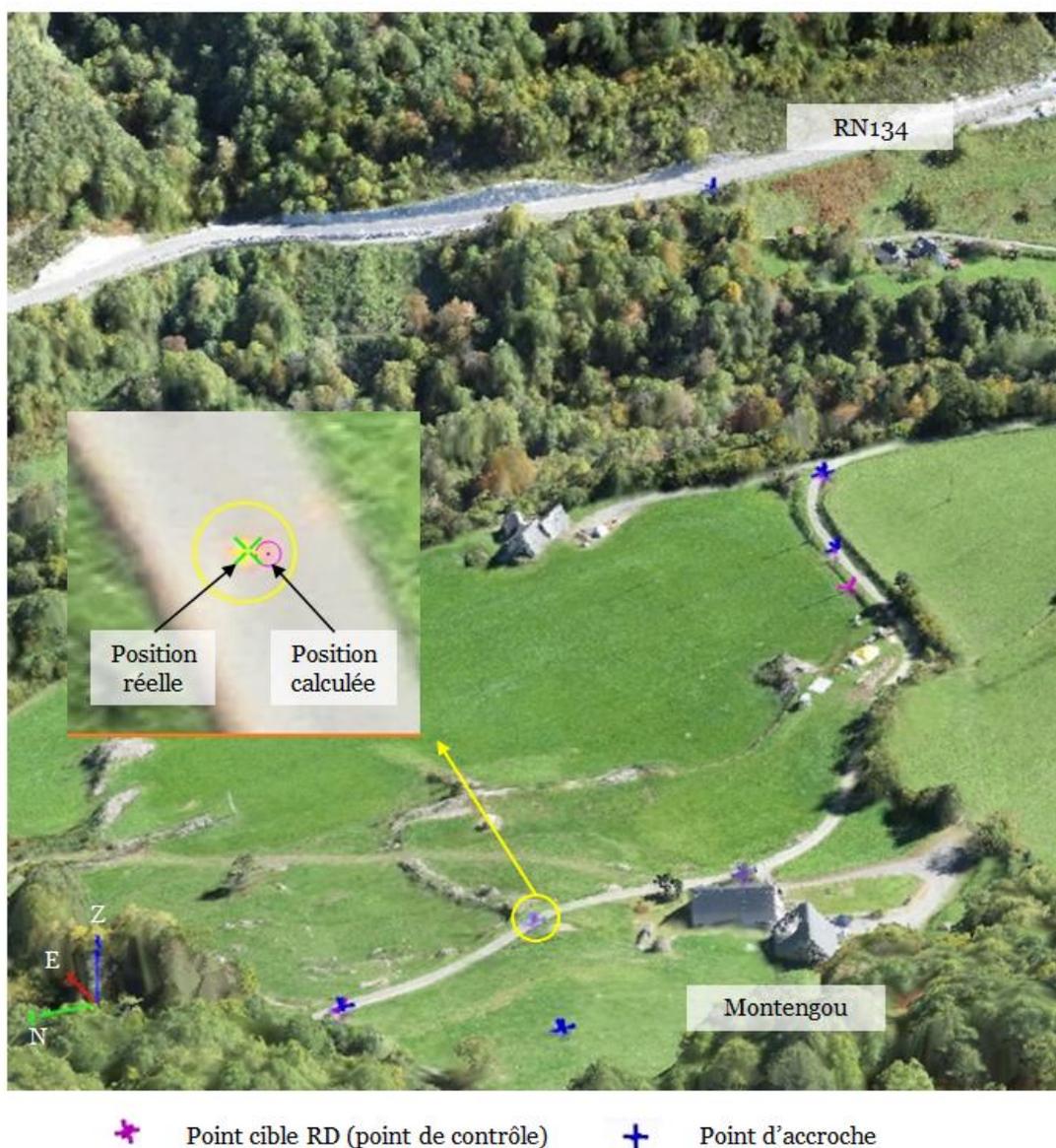


Figure IV.16. Exemple de point de contrôle pour la campagne 2015 : le point cible RDB17 du réseau de détail n°2.

### IV.2.3 CAMPAGNE PRINTEMPS 2016 : LA PENE DU THES ET LE PEILHOU

2 vols ont été effectués au printemps 2016 : le vol « 2016\_v1 » le 7 juin au niveau la zone active du DSL de la Cristallère (la Pène du Thès) et le vol « 2016\_v2 » le 8 juin au niveau de la partie basse du glissement rocheux complexe du Peilhou (cf. Tableau IV.16).

Nous n'avons pas réalisé de projet commun pour cette campagne puisque les 2 vols effectués n'ont pas de partie commune permettant d'assurer un seul bloc pour le traitement.

#### IV.2.3.1 Vol 1 : La pène du Thès (zone active du DSL de la Cristallère)

Nous avons obtenu pour « 2016\_v1 » à l'issue de l'acquisition 96 images géolocalisées. Lors du traitement initial (l'étape 1), 97% des photos géolocalisées ont été calibrées soit 94 photos. La différence relative entre les paramètres de caméra interne initiale et optimisée est de 2,28%. Nous obtenons à l'issue du traitement, un nuage de points 3D avec un GSD de 8,28 cm/pixel pour une couverture de 0,72 km<sup>2</sup> (cf. Figure IV.17).

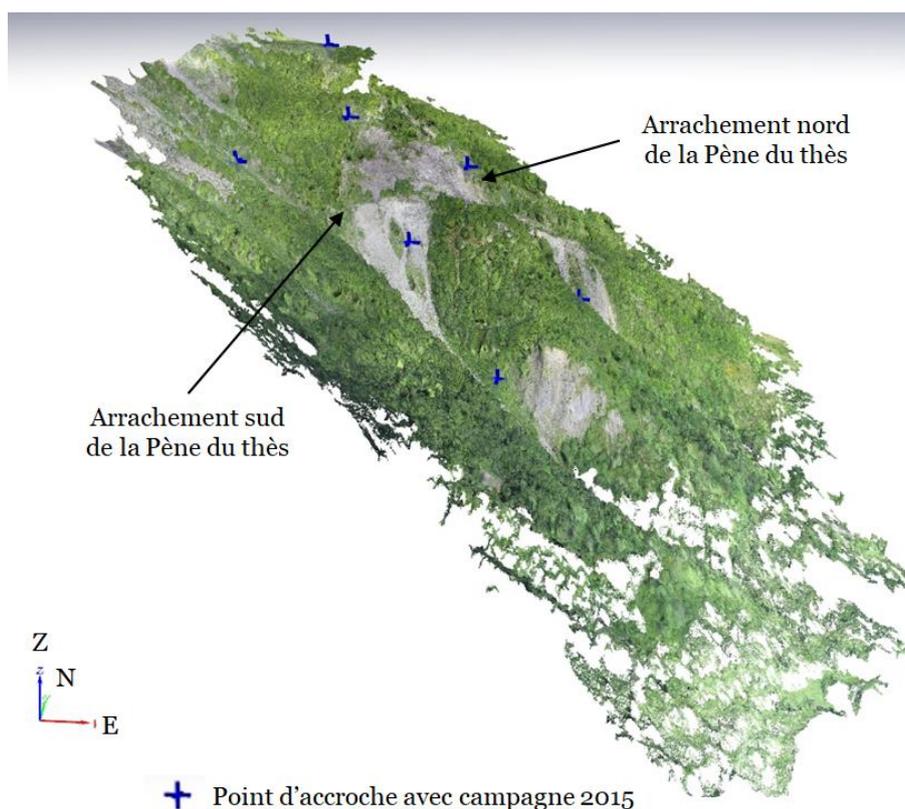


Figure IV.17. Nuage de points 3D texturé complet au niveau de la Pène du Thès (zone active du DSL de La Cristallère). Résultat obtenu à partir du traitement du vol « 2016\_v1 ».

### IV.2.3.2 Vol 2 : la partie basse du glissement rocheux complexe du Peillhou

Nous avons obtenu pour « 2016\_v2 » à l'issue de l'acquisition 113 images géolocalisées. Lors du traitement initial (l'étape 1), 100% des photos géolocalisées ont été calibrées. La différence relative entre les paramètres de caméra interne initiale et optimisée est de 2,17%. Nous obtenons à l'issue du traitement, un nuage de points 3D avec un GSD de 6,28 cm/pixel pour une couverture de 0,51 km<sup>2</sup> (cf. Figure IV.18).

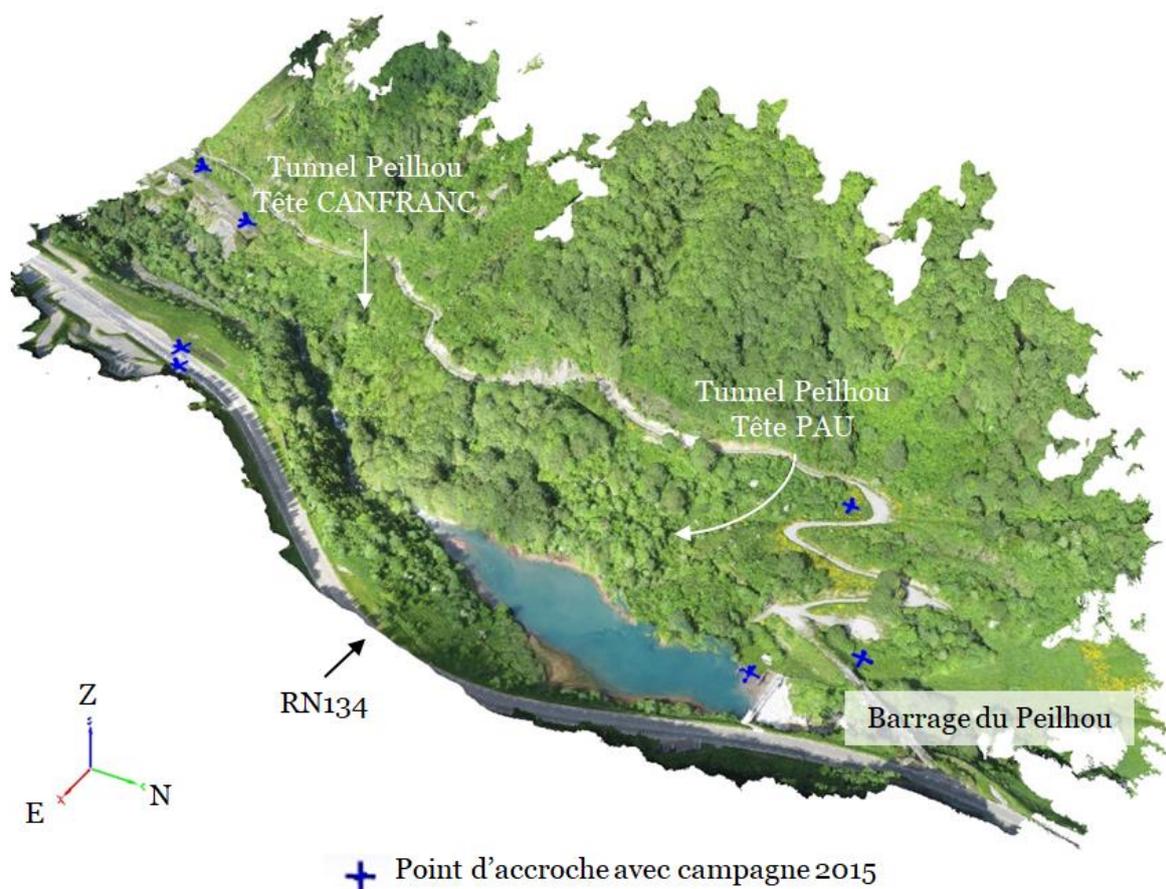


Figure IV.18. Nuage de points 3D texturé complet au niveau de la partie basse du glissement rocheux complexe du Peillhou. Résultat obtenu à partir du traitement du vol « 2016\_v2 ».

Que ce soit pour le vol « 2016\_v1 » ou le vol « 2016\_v2 », des points de contrôles avec la campagne de 2015 ont été rajoutés.

### IV.3 SYNTHÈSE GÉOLOGIQUE ET STRUCTURALE DES DÉFORMATIONS MESURÉES DANS LE DSL DE LA CRISTALLÈRE

L'ensemble des applications utilisé dans ce travail de recherche (couplage des mesures de positionnement par satellites de cibles terrestres et des observations avec un drone de type aile volante) entre les années 2014 et 2016, a permis de mettre en évidence les déformations actuelles du glissement de la Cristallère défini comme de type DSL par Lebourg et al. (2014). Ces déformations se traduisent par des mouvements planimétriques ou altimétriques donnant des déplacements d'ordre millimétrique, avec des affaissements, des soulèvements, des mouvements vers le sud, vers le nord ou vers l'est du versant rocheux de la Cristallère. Ces enregistrements de déplacements ont surtout été définis dans deux zones principales du DSL de la Cristallère se situant, pour l'une en partie haute du glissement, et pour l'autre en partie basse et même sur l'ensemble du massif de la Cristallère. Il s'agit maintenant d'analyser et synthétiser ces déformations par rapport aux données géologiques et géomorphologiques de terrain afin de proposer un modèle structural pour le DSL de la Cristallère permettant d'expliquer le pourquoi de mouvements apparemment aussi disparates.

Rappelons tout d'abord que le DSL de la Cristallère est conditionné d'un point de vue structural par des grands accidents de directions N-S à subméridiens en partie haute du versant qui sont identifiables à partir d'un signal électromagnétique basé sur l'utilisation d'ondes de basse fréquence VLF (cf. Figure III.16) ; ces grands accidents correspondent d'ailleurs à la direction de creusement de la vallée d'Aspe par le glacier principal mis en évidence par Lebourg (2000) et Fabre et al. (2003). À cette direction subméridienne d'accidents qualifiés de tardifs dans l'orogénèse alpine par les auteurs (Muller & Roger, 1977 ; Bixel et al., 1985 ; Ternet et al., 2003, 2004), s'ajoute des accidents plus anciens de l'orogénèse hercynienne de direction N50°/60° et N140°/150° pour les deux principaux du versant (Mirouse, 1966 ; Muller, 1973, Muller & Roger, 1977 ; Bixel et al., 1985 ; Bichot, 1986 ; Lebourg, 2000 ; Lebourg et al., 2003, 2014). Par ailleurs l'établissement de la carte structurale et tectonique des différentes phases de déformations de la vallée d'Aspe entre Urdos et le Col du Somport (cf. Figure II.27) montre que les plis majeurs qui structurent le socle paléozoïque du versant est de la Cristallère ont des directions N90° à N115° dans les formations permienes sommitales du DSL, mais pas toujours, et N50° à N90° dans le Carbonifère situé dans les parties médianes et basses du glissement. Cette observation structurale indique que les axes des plis de taille décamétrique à hectométrique qui affectent le versant est de la Cristallère (cf. Figure II.25 & Figure II.26) sont perpendiculaires (ou obliques) à l'escarpement principal et ne sont, en conséquence, pas propices à l'instabilité du versant rocheux. Par ailleurs, comme le montrent les mesures structurales des plans de stratification des grès et schistes du Carbonifère et du Permien, les axes de plis en genoux sont rentrants dans le versant et participent donc à la stabilité de celui-ci comme l'indique l'axe de l'anticlinal du Lazaret (cf.

Figure II.24). De fait, seuls les grands accidents de direction No° à subméridienne sont responsables de l'instabilité gravitaire du versant de la Cristallère. L'un d'eux correspond d'ailleurs au miroir de faille visible dans l'escarpement principal du DSL avec un pendage aval de 70° à 80°E. À ces accidents N-S s'ajoutent des directions de fractures N50°/60° et N140°/150° qui s'associent à la direction majeure des accidents N-S et participent aussi à la déstructuration du versant comme nous allons le voir dans la suite de la synthèse. Ce réseau d'accidents et de failles correspond, au même titre que la forte pente du versant, aux facteurs géologiques dits de « prédisposition » à l'instabilité du versant est de la Cristallère, auquel s'ajoutent bien sûr les facteurs déclenchants qui sont : i) le retrait glaciaire post-würm du glacier de la vallée d'Aspe (décompression du versant ; Fabre et al., 2003), ii) ; mais surtout l'activité sismique de cette région des Pyrénées, et notamment l'argumentation en faveur du séisme de Lavedan en l'an 580 mis en évidence par Lebourg et al. (2014).

Pour le versant est de la Cristallère, nos travaux de relevé géomorphologique et cartographique de terrain ont permis de positionner à la fois le réseau de fracturation et tous les escarpements secondaires du substratum rocheux (Carbonifère et Permien) à l'intérieur du glissement de la Cristallère.

Il résulte de ces travaux l'établissement d'un modèle structural synthétique de déstructuration du glissement de la Cristallère suivant une multitude de panneaux (plus de 200 pour les principaux) délimités par les principales directions de fractures qui les affectent; ce sont les directions (cf. Figure IV.19a) :

- N170° à N10° correspondant aux grands accidents subméridiens qui guident la discontinuité majeure du DSL de la Cristallère. Ces accidents N-S se poursuivent au nord du DSL de la Cristallère dans les calcaires dévoniens de l'anticlinal du Fort du Portalet et plus au sud au-dessus du glissement de terrain du Peilhou jusqu'au lac de Clarens ;
- N50°, N60° à N70° visibles à l'intérieur du DSL dans la partie médiane et basse du versant ; ces fractures délimitent la bordure nord du DSL de la Cristallère et alimentent le cône de déjection quaternaire situé au lieu-dit Bérat du Bas ;
- N140° à N150° visibles dans tout le versant et majoritairement responsables de la déstructuration dans la partie haute et sud du DSL de la Cristallère ;
- N95° à N110°, directions de fracturation très marquées dans la partie sud du DSL, et responsables de la déstructuration du versant en partie médiane avec une vidange progressive des panneaux glissés pour donner un cône de déjection torrentiel au nord de la Pène du Thès.

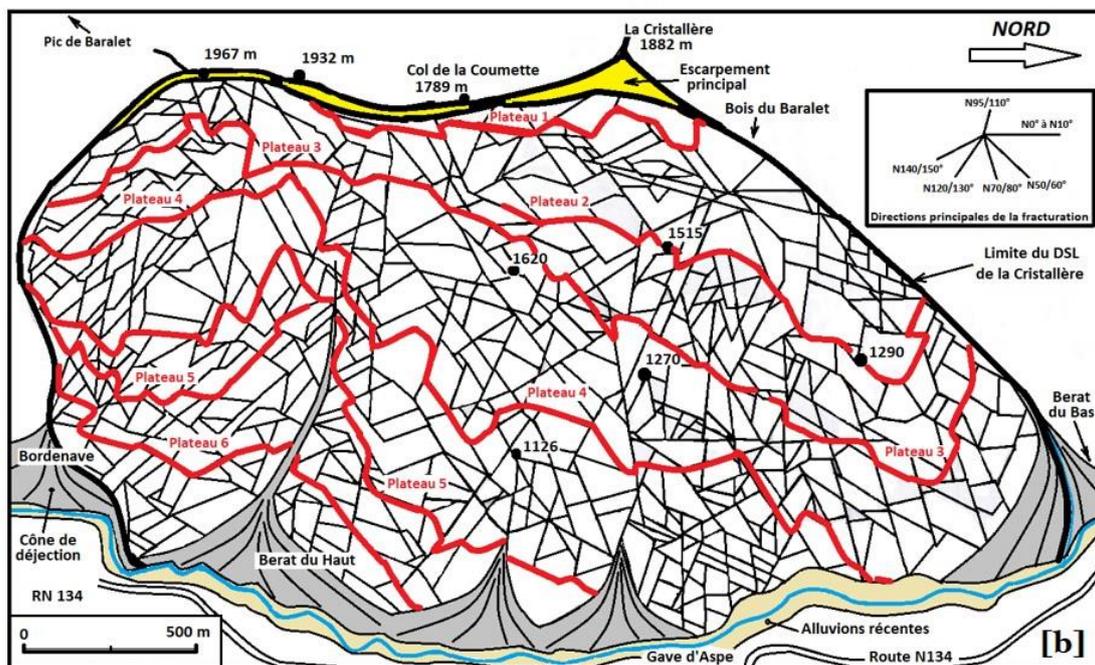
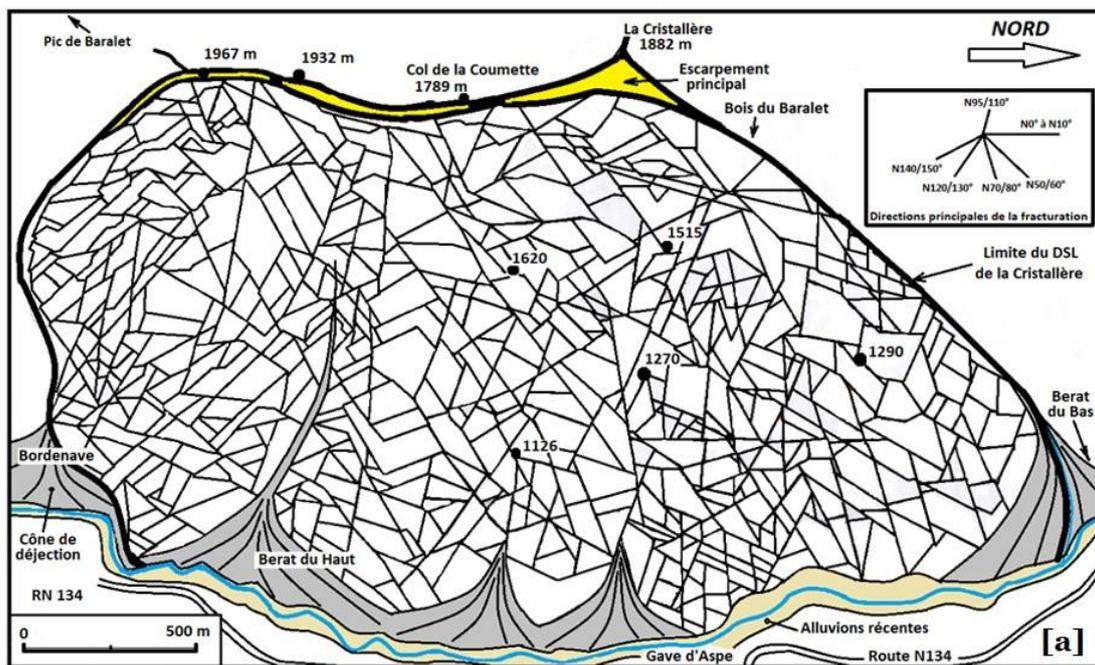


Figure IV.19. Cartes structurales en perspective 3D dans les limites du DSL avec : la fracturation [a] et les différents plateaux [b] marqués par six lignes rouges qui les délimitent. Chaque plateau se situe au-dessus des lignes rouges, et chaque ligne rouge correspond à un escarpement secondaire dont la direction est guidée par le réseau principal de fracturation.

La première remarque sur la structuration du versant est de la Cristallère ainsi déduite est que les directions originelles des fractures sont modifiées par exemple sous l'escarpement principal du sommet de la Cristallère (Bois du Baralet) où les panneaux disloqués dans le DSL indiquent une rotation progressive en descendant dans le versant. Cette rotation de 10° à 15° des strates et axes de plis, mise en évidence dans le Permien font que les accidents N0° s'orientent N10° à N15° dans la pente en dessous du Bois du Baralet. La seconde remarque porte sur la structuration des accidents majeurs subméridiens qui guident et conditionnent le glissement de la Cristallère. Ces derniers ont été observés et mesurés dans la partie médiane et surtout la partie sud du DSL (ravin de Lapachouaou), où nous constatons qu'ils correspondent en fait à un réseau de fractures très dense espacé d'une centaine de mètres. Cette observation confirme que ce n'est pas un accident N-S unique qui guide le glissement de la Cristallère, marqué par l'escarpement principal de la Cristallère, mais une succession d'accidents subméridiens visibles dans le ravin de Lapachouaou.

Au final, la carte structurale de la fracturation (cf. Figure IV.19a) peut être explicitée dans la compréhension de la déstructuration du versant en y positionnant les lignes des escarpements secondaires majeurs visibles dans le versant du DSL de la Cristallère. En faisant ce travail cartographique synthétique, on arrive à construire et dessiner une succession de linéaments structuraux à l'intérieur du DSL pour aboutir au dessin cartographique d'une succession de six plateaux altimétriques en marche d'escalier entre la partie haute et basse du DSL de la Cristallère (cf. Figure IV.19b). Toutefois d'autres plateaux intermédiaires existent, mais nous arrêterons là les détails de la cartographie du grand glissement de la Cristallère où le jeu en touche de piano des différents blocs peut parfois rendre incompréhensible son comportement dynamique. C'est ce qui sera expliqué dans la suite de cette synthèse.

La carte structurale synthétique (cf. Figure IV.19b) des différents plateaux qui constituent le détail du DSL de la Cristallère montre à l'évidence que :

- Le démantèlement et l'affaissement du DSL sont plus prononcés au nord qu'au sud. On remarque en effet une descente plus importante de la ligne marquant le plateau N°1 en haut du DSL au nord, ce qui se voit encore mieux pour les lignes des plateaux N°2 et N°3. Ce constat se voyait déjà dans l'escarpement principal du DSL puisque dans la partie nord l'affaissement le long de l'accident N-S est de plus de 100 mètres alors qu'au sud il est tout juste de 30 mètres (cf. Figure IV.19a ; couleur jaune). De ces déductions cartographiques nous pouvons en conclure que l'affaissement rocheux du DSL de la Cristallère a été plus important au nord qu'au sud d'un point de vue altimétrique. Il a d'ailleurs alimenté un énorme cône de déjection qui présente sur le terrain un bombement actif (bourrelet frontal du DSL) au pied du Gave d'Aspe comme l'indique la forme incurvée du Gave d'Aspe vers le Berat du Bas ;
- La bordure sud du DSL de la Cristallère reste encore accrochée au-dessus de la Pène d'Arret en partie haute (entre 1600 et 1950 m d'altitude) malgré l'important cône de

déjection qui reste très actif dans le secteur, justement parce qu'il prépare un probable démantèlement à venir ;

- La partie médiane du DSL de la Cristallère séparant en deux parties le DSL au-dessus du cône déjection du Bérat du Haut au niveau de l'anticlinal dévonien de la Pène du Thès (cf. Figure II.12 & Figure II.27), traduit une vidange partielle des plateaux N°4 et N°5 depuis 1650 m d'altitude dans les formations rouges du Permien avec un effet rétroactif déjà souligné dans la partie II (cf. Figure II.30, Figure II.31 & Figure II.32). Nous notons ici un intense couloir de fracturation N95° à N100° qui indique un probable décrochement tardif de ces accidents, décrochement visible jusqu'en ligne de crête.

Si nous voulons maintenant, à la lumière de cette proposition de modèle géologique et géomorphologique de démantèlement et de déstructuration progressive du DSL de la Cristallère (cf. Figure IV.19b), y intégrer les déplacements planimétriques et altimétriques du versant obtenus par les différentes méthodes de mesure (cf. partie IV.1 & partie IV.2), nous pouvons établir un modèle dynamique des déplacements des différents plateaux du DSL de la Cristallère où le sens général des mouvements est noté par des flèches indicatives et explicatives (cf. Figure IV.20) de ce qui a été mesuré.

Dans ce modèle dynamique nous constatons, en correspondance avec les mesures obtenues avec les mesures de positionnement par satellites de cibles terrestres et les observations aériennes avec un drone type aile volante, que (cf. Figure IV.20) :

- La limite nord du DSL de la Cristallère (entre le Bois du Baralet et le Bérat du Bas) se déstructure avec une descente progressive vers le nord et le nord-est dans la partie haute et basse avec localement des panneaux des plateaux N°2 et N°3 qui fluent vers l'est dans le sens de la pente ;
- La limite haute centrale du DSL, au niveau du plateau N°1, montre globalement un déplacement vers le sud ou le sud-est en direction du ravin descendant au droit du Bérat du Haut bien que lors d'une recrudescence de secousses sismiques comme celle enregistrée en mai 2016 nous assistons plutôt ponctuellement à un réajustement de la zone (cf. Figure IV.21) ;
- Les parties basses du DSL montrent des mouvements généraux vers l'est et le sud-est.

Précisons que chaque plateau est constitué d'une multitude de blocs qui jouent entre eux suivant des mouvements disparates compte tenu de l'inclinaison des pendages des plans de fractures non visibles sur le modèle structural dynamique. Aussi, les fractures mécaniques à pendage normal ou à pendage inverse peuvent induire soit des affaissements soit des soulèvements. En effet, lorsqu'un bloc d'un plateau s'affaisse il induit une possible remontée des blocs adjacents, lorsqu'un bloc descend en coin il peut dans un jeu de bloc faire remonter et rentrer dans le versant un bloc adjacent. Ce sont tous ces jeux de blocs montants, descendants, s'affaissant qui ont été enregistrés et mesurés et présentés ci-avant (cf. partie IV.1

& partie IV.2). Comme les mesures obtenues ne couvrent qu'une partie du DSL, il n'est pas possible d'avoir à ce jour un modèle précis et complet englobant la totalité de la dynamique du DSL. Toutefois les déplacements altimétriques et planimétriques ont été établis avec précision tant en partie haute qu'en partie basse.

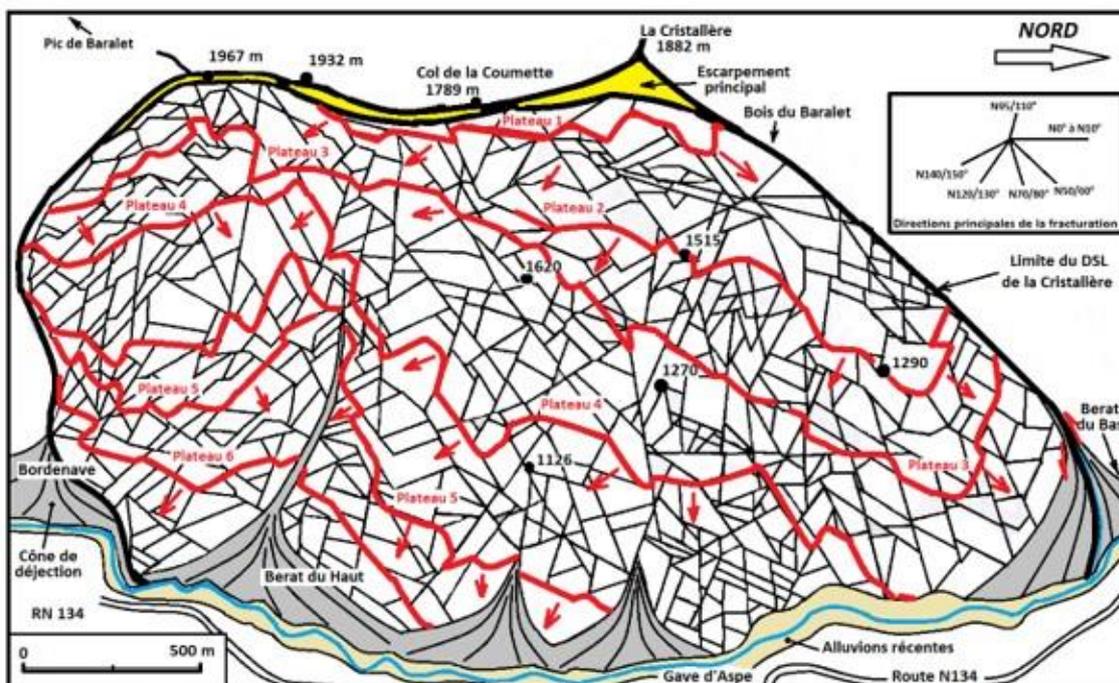


Figure IV.20. Modèle dynamique des déplacements actuels du DSL de la Cristallère en perspective 3D montrant comment les différents plateaux se déstructurent en différents blocs hectométriques avec des déplacements généraux vers le sud/sud-est, le nord/nord-est ou l'est à sud-est. Au nord et en partie basse est noté le mouvement qui affecte le grand cône de déjection au-dessus de Bérat du Bas.

Une coupe synthèse générale transversale du DSL de la Cristallère est proposée ici dans ces dimensions les plus probables (cf. Figure IV.22). Cette interprétation est fonction des données structurales de surface et des observations faites précédemment (cf. Figure IV.19 & Figure IV.20), sans qu'il soit possible pour l'instant d'en vérifier l'exactitude. Notons qu'une telle profondeur du plan de rupture majeur du DSL de la Cristallère traduit une épaisseur du DSL de plus de 300 mètres dans sa partie centrale. Des investigations géophysiques font partie des perspectives de recherche à entreprendre dans ce sens ; notons tout de même que les 5 tomographies de résistivités électriques réalisées dans le cadre de ce travail (cf. Figure III.16) n'ont malheureusement pas intercepté cette zone de cisaillement.

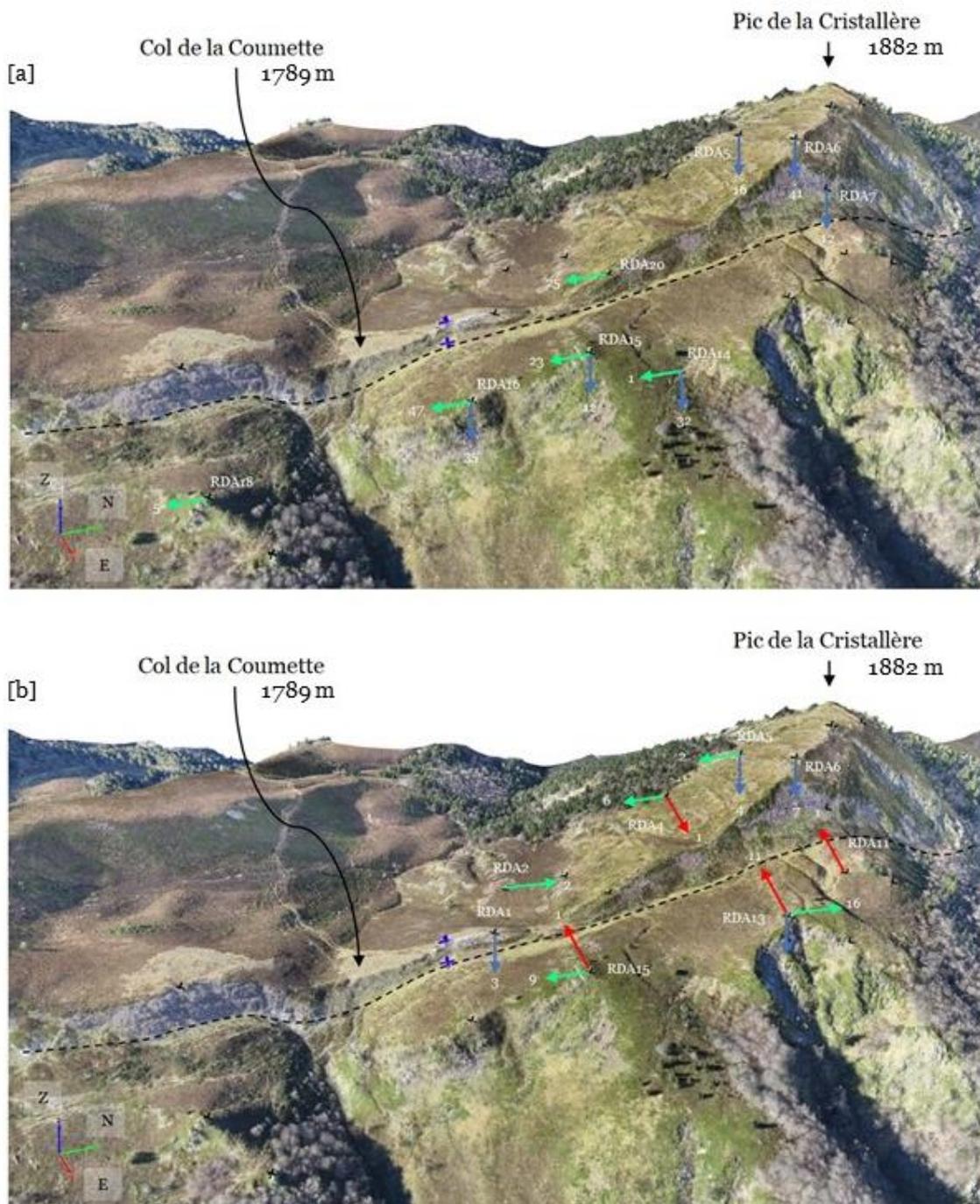


Figure IV.21. Déplacements minimaux avérés en millimètres au niveau de la partie sommitale du DSL de la Cristallère entre le 30 octobre 2014 et le 7 juin 2016 [a] et plus précisément entre le 17 mai et le 7 juin 2016 [b] sur le nuage de points 3D texturé obtenu avec la campagne drone 2015. L'accident principal N-S qui conditionne l'escarpement est représenté en pointillé.

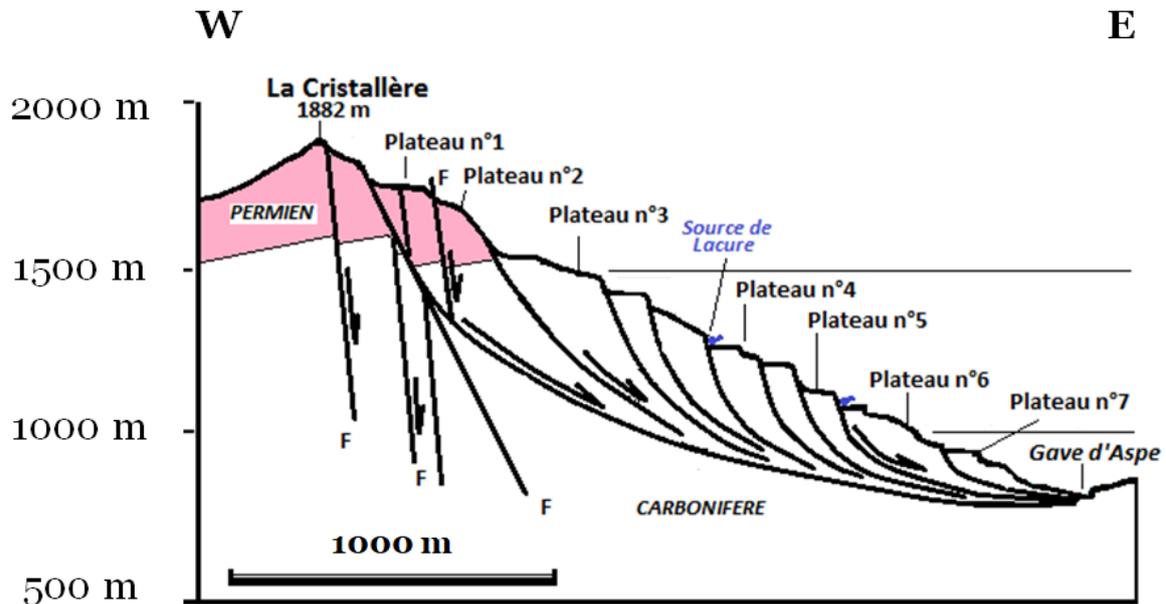


Figure IV.22. Coupe géologique synthétique ouest-est passant par le sommet de la Cristallère et montrant i) les accidents subméridiens à l'origine du DSL et ii) les plateaux successifs entre 1850 et 950 mètres d'altitude. Notons la présence de sources en pied de plateau et la structure inclinée plongeant vers l'ouest du substratum paléozoïque.

Au final, le canevas général de la dynamique actuelle du DSL de la Cristallère (cf. Figure IV.20), correspond à des réajustements composites d'un mouvement précurseur déclenché historiquement il y a 1300 ans (Lebourg et al., 2014). La complexité des mouvements tant altimétriques que planimétriques définis précédemment et dans la synthèse doit être intégrée dans ce modèle dynamique synthétique qui demande à être encore amélioré avec des mesures sur une plus longue période pour y reconnaître les zones les plus actives et les plus dangereuses dans de futurs projets d'aménagements. Il est maintenant établi que des mouvements de l'ordre à minima du mm/an sont présents entre 2014 et 2016 et doivent être pris en compte dans tout futur projet d'aménagement, surtout que les déplacements centimétriques ont été enregistrés jusqu'à 50 mètres de profondeur, plus au sud du versant rive gauche comme l'atteste le glissement rocheux du Peilhou (Lebourg, 2000 ; Fabre et al., 2002). Rappelons également qu'un DSL est généralement contenu dans un DSGSD, et qu'il peut de surcroît être un indice de l'existence d'un DSGSD.



## V. CONCLUSION GENERALE

### Résultats majeurs, limites inhérentes et perspectives

Les travaux de recherche développés ici se sont intéressés à la poursuite de l'étude d'une grande instabilité gravitaire réalisée par Lebourg et al. (2014) : le DSL de la Cristallère en haute Vallée d'Aspe dans les Pyrénées Françaises. Outre le fait d'avoir permis une amélioration certaine de la connaissance du site, cette vaste étude a également permis de tester surtout de nouveaux outils comme le positionnement satellitaire terrestre de cibles et l'utilisation d'un drone de type aile volante.

Tous ces points ont pu être développés, mais il faut reconnaître avec beaucoup plus de difficultés que prévu, avec plusieurs raisons pour cela, toutes plus ou moins liées à la taille immense et largement sous-estimée du massif de la Cristallère et donc de l'instabilité. Nous pouvons par exemple citer :

- i) La mise en place des cibles terrestres artificielles. Un équipement en repères a pu être mis en œuvre rapidement, avec plus de 200 points de mesure, mais il a fallu rapidement se rendre à la raison : la taille du versant étudiée était trop importante pour permettre un suivi détaillé de l'ensemble du massif.
- ii) Le choix du matériel de suivi. Que ce soit pour le positionnement par satellites de cibles terrestres ou les observations aériennes avec un drone type aile volante, plusieurs mois ont été nécessaires pour choisir un matériel adéquat et adapté à la taille du site. Les récepteurs GPS et GLONASS se devaient d'être précis en conditions montagneuses avec un relief marqué et des forêts ; le drone quant à lui devait présenter des capacités d'autonomie, de précision et de résolution suffisantes pour survoler l'ensemble du site.
- iii) La définition d'un protocole de suivi efficace. L'ampleur du site étudié et sa particularité (massif montagneux partiellement boisé, éloignement des stations GPS/GLONASS permanentes, etc.) ont nécessité de nombreux essais pour définir un protocole satisfaisant, avec donc une perte de temps qui n'a pas permis d'avoir un recul suffisant, en particulier pour des instabilités de ce type au mouvement globalement lent.
- iv) Les conditions inhérentes au milieu. Cela paraît évident quand on travaille en montagne, mais le site étudié se trouvant en altitude, le travail de terrain se

trouve systématiquement perturbé, voire impossible en période hivernale en raison de la neige et en période printanière avec la forte poussée du couvert végétal. C'est un frein considérable pour toutes les méthodes de suivi topographiques.

Ainsi, ces quelques exemples montrent la difficulté que nous avons rencontrée à mettre en place tous les outils nécessaires au suivi de l'instabilité. Ils constituent les principaux obstacles affrontés, mais ne sont pas les seuls puisque d'autres désagréments inattendus pourraient être cités : un drone capricieux finissant en haut d'un hêtre de 30 m de hauteur, une attaque de milans sur cet « oiseau jaune » anormal, la traque de l'appareil disparu en forêt, etc. C'est sans compter un dernier paramètre que nous pourrions nommer « malchance climatique ». En effet, les travaux de recherche présentés ici ont débuté en 2015 (pour le premier différentiel), soit juste après deux années climatiques exceptionnelles, avec un couvert neigeux très important en 2013 et une pluviométrie record en 2014 (record historique de cumul sur 6 mois à la station météorologique de Pau-Uzein en 60 ans d'existence). Il ne fait aucun doute que ces deux années particulières, que ce soit par surcharge pondérale importante liée à la neige ou par une pluviométrie exceptionnelle, ont pu engendrer des mouvements beaucoup plus nets que ceux mesurés durant nos travaux. Les conclusions avancées ici, mettant plutôt en jeu le facteur sismique dans les mouvements de l'instabilité globale - ce qui reste vrai pour la période étudiée – auraient pu être différentes si le suivi avait pu inclure ces deux années, d'autant plus avec ces facteurs réputés aggravants que sont l'eau et la surcharge pondérale.

Malgré tous les désagréments rappelés ci-dessus, il n'en reste pas moins que les travaux effectués ont pu atteindre voire dépasser les objectifs fixés, malgré un certain sentiment d'inachevé. Ainsi, ces travaux de recherche ont permis surtout de répondre à l'un des défis de la communauté scientifique où des lacunes subsistent à savoir la dynamique temporelle à court terme d'une instabilité de grande ampleur dans les Pyrénées. Nous proposons pour y répondre un modèle dynamique des déplacements actuels du DSL de la Cristallère en montrant les différents plateaux qui se déstructurent en différents blocs hectométriques avec des déplacements généraux qui sont ici de l'ordre du mm/an. Cependant, celui-ci demande à être complété avec une période de surveillance plus longue et des investigations géophysiques complémentaires.

Dans une société où de moins en moins de place est accordée au temps, les méthodes et protocoles que nous proposons pour le suivi (le positionnement par satellites GPS/GLONASS de cibles terrestres et les observations aériennes avec un drone de type aile volante) peuvent permettre dans un temps relativement court d'établir un premier état des lieux. Ces outils ont un intérêt pour l'ensemble de la communauté scientifique, bien au-delà du site étudié ici. Ainsi, une période de visite à la demande et une étude à moindre coût sont les avantages majeurs de l'utilisation d'un drone pour une simple reconnaissance ou l'auscultation

complète d'un site, qui pourra être complété par un suivi de repères par satellite. Suivre l'évolution de versant de ce type est plausible : nous venons de le démontrer. Cependant, précisons que toutes les technologies automatisées et sophistiquées doivent être parfaitement maîtrisées par les utilisateurs. Ces outils sont donc promis à un bel avenir dans le domaine de la surveillance des instabilités gravitaires de grandes ampleurs où finalement ils conquièrent déjà aujourd'hui progressivement les marchés scientifiques et industriels.

### Prospectives

Retenons bien évidemment que l'intérêt pour les scientifiques d'étudier les instabilités gravitaires de grandes ampleurs est tout à fait légitime : c'est celui de prévenir. En fait, si nous considérons l'ensemble du versant (les déformations gravitaires à petite échelle), cela permet de mieux expliquer les différents mouvements qui le composent (les déformations gravitaires à grande échelle). Étudier une instabilité gravitaire de grande ampleur revient alors à s'intéresser à l'une des causes des problèmes rencontrés en montagne et pas seulement aux conséquences.

Remarquons tout de même que bien trop souvent, détenir la connaissance ne suffit pas pour modifier notre comportement ni provoquer un changement réel et durable. Prévoir l'irréparable autrement dit la force ou l'intensité d'un événement dans une moindre mesure est un objectif majeur. Mais malgré les progrès récents, cette prévision reste difficile à faire. D'autant plus qu'elle fait intervenir de nombreux facteurs liés à la complexité de chaque site. Le DSGSD en fait partie.

Rajoutons que le temps est un phénomène immatériel, qui ne se voit ni ne s'entend, et sur lequel nous n'avons aucune prise. La surveillance sur plusieurs années est donc primordiale et indispensable.



## REFERENCES

**Agliardi, F., Crosta, G., & Frattini, P. (2012).** Slow rock-slope deformation. Dans J. Clague, & D. Stead (Éds.), *Landslides : Types, Mechanisms and Modeling* (pp. 207-221). Cambridge: Cambridge University Press.

**Agliardi, F., Crosta, G., & Zanchi, A. (2001).** Structural constraints on deep-seated slope deformation kinematics. *Engineering Geology*, 59(1-2), 83-102.

**Agliardi, F., Crosta, G., Frattini, P., & Malusà, M. (2013).** Giant non-catastrophic landslides and the long-term exhumation of the European Alps. (T. Harrison, Éd.) *Earth and Planetary Science Letters*, 365, 263-274.

**Agliardi, F., Crosta, G., Zanchi, A., & Ravazzi, C. (2009b).** Onset and timing of deep-seated gravitational slope deformations in the eastern Alps, Italy. *Geomorphology*, 103(1), 113-129.

**Agliardi, F., Zanchi, A., & Crosta, G. (2009a).** Tectonic vs. gravitational morphostructures in the Central Eastern Alps (Italy): constraints on the recent evolution of the mountain range. *Tectonophysics*, 474(1-2), 250-270.

**Al Saffar, M. (1993).** Géométrie et modélisation numérique des structures anticlinales. Exemples : Atlas saharien (Algérie), Rides sud rifaines (Maroc) et Pyrénées (France et Espagne). Thèse de doctorat sous la direction de G. Duee ; Pau: Université de Pau.

**Alexandre, P. (1990).** Les séismes en europe occidentale de 394 à 1259 : Nouveau catalogue critique. Bruxelles: Observatoire Royal de Belgique.

**Alexandrowicz, Z., & Alexandrowicz, S. (1988).** Ridge-top trenches and rifts in the Polish Outer Carpathians. *Annales Societatis Geologorum Poloniae*, 58(1-2), 207-228.

**Ambrosi, C., & Crosta, G. (2006).** Large sackung along major tectonic features in the Central Italian Alps. *Engineering Geology*, 83(1-3), 183-200.

**Ambrosi, C., & Crosta, G. (2011).** Valley shape influence on deformation mechanisms of rock slopes. Geological Society, London, *Special Publications*, 351, 215-233.

**Antoine, P., & Giraud, A. (1995).** Typologie des mouvements de versants dans un contexte opérationnel. *Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 51(1), 57-62.

**Apuani, T., & Corazzato, C. (2009).** Numerical model of the Stromboli volcano (Italy) including the effect of magma pressure in the dyke system. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 42(1), 53-72.

**Bachmann, D. (2006).** Modélisation physique tridimensionnelle des mouvements gravitaires de grande ampleur en milieu rocheux. Thèse de doctorat sous la direction de S. Bouissou & A. Chemanda, Nice: Université Nice-Sophia-Antipolis.

**Bachmann, D., Bouissou, S., & Chemenda, A. (2009).** Analysis of massif fracturing during Deep-Seated Gravitational Slope Deformation by physical and numerical modeling. *Geomorphology*, 103(1), 130-135.

**Ballantyne, C., Sandeman, G., Stone, J., & Wilson, P. (2014).** Rock-slope failure following Late Pleistocene deglaciation on tectonically stable mountainous terrain. *Quaternary Science Reviews*, 86, 144-157.

**Barla, G., Antolini, F., Barla, M., Mensi, E., & Piovano, G. (2010).** Monitoring of the Beauregard landslide (Aosta Valley, Italy) using advanced and conventional techniques. *Engineering Geology*, 116(3-4), 218-235.

**Barnolas, A., & Chiron, J. (1996).** Synthèse géologique et géophysique des Pyrénées (2 volumes). Orléans: BRGM.

**Baroň, I., Kernstocková, M., Faridi, M., Bubík, M., Milovský, R., Melichar, R., . . . Babůrek, J. (2013).** Paleostress analysis of a gigantic gravitational mass movement in active tectonic setting: The Qoshadagh slope failure, Ahar, NW Iran. *Tectonophysics*, 605, 70-87.

**Barth, N. (2014).** The Cascade rock avalanche: implications of a very large Alpine Fault-triggered failure, New Zealand. *Landslides*, 11(3), 327-341.

**Beck, A. (1968).** Gravity faulting as a mechanism of topographic adjustment. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 11(1), 191-199.

**Benko, B., & Stead, D. (1998).** The Frank slide: a reexamination of the failure mechanism. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(2), 299-311.

**Berardino, P., Costantini, M., Franceschetti, G., Iodice, A., Pietranera, L., & Rizzo, V. (2003).** Use of differential SAR interferometry in monitoring and modelling large slope instability at Maratea (Basilicata, Italy). *Engineering Geology*, 68(1-2), 31-51.

**Bhardwaj, A., Sam, L., Akanksha, Javier Martín-Torres, F., & Kumar, R. (2016).** UAVs as remote sensing platform in glaciology: Present applications and future prospects. *Remote Sensing of Environment*, 175, 196-204.

**Bianchi Fasani, G., Di Luzio, E., Esposito, C., Evans, S., & Scarascia Mugnozza, G. (2014).** Quaternary, catastrophic rock avalanches in the Central Apennines (Italy): Relationships with inherited tectonic features, gravity-driven deformations and the geodynamic frame. *Geomorphology*, 211, 22-42.

**Bichot, F. (1986).** La tectonique distensive carbonifère dans les Pyrénées. Corrélations est-canadiennes et ouest-européennes. Thèse de doctorat, Bordeaux: Université Bordeaux III.

**Bisci, C., Dramis, F., & Sorriso-Valvo, M. (1996).** Rock flow (sackung). Dans R. Dikau, D. Brunnsden, L. Schrott, & M.-L. Isben (Éds.), *Landslide Recognition: Identification, Movement and Causes* (pp. 150-160). Chichester, Angleterre: John Wiley & Sons.

**Bixel, F. (1984).** Le volcanisme stéphano-permien des Pyrénées. Thèse de doctorat, Toulouse: Université Paul Sabatier.

**Bixel, F., & Lucas, C. (1983).** Magmatisme, tectonique et sédimentation dans les fossés stéphano-permiens des Pyrénées occidentales. *Revue de géologie dynamique et de géographie physique*, 24(4), 329-342.

**Bixel, F., Muller, J., & Philippe, R. (1985).** Carte géologique Pic du Midi d'Ossau et Haut Bassin du Rio Gallego (1/25 000). Bordeaux, France: Université de Bordeaux III.

**Blikra, L., Longva, O., Braathen, A., Anda, E., Dehls, J.-F., & Stalsberg, K. (2006).** Rock slope failures in Norwegian Fjord areas: examples, spatial distribution and temporal pattern. Dans S. Evans, G. Mugnozza, A. Strom, & R. Hermanns (Éds.), *Landslides from Massive Rock Slope Failure* (pp. 475-496). Dordrecht: Springer.

**Bois, S., Bouissou, S., & Guglielmi, Y. (2008).** Influence of major inherited faults zones on gravitational slope deformation: A two-dimensional physical modelling of the La Clapière area (Southern French Alps). *Earth and Planetary Science Letters*, 272(3-4), 709-719.

**Bois, T. (2010).** Etude du rôle des hétérogénéités structurales et de l'altération sur la déstabilisation des massifs rocheux par une approche couplée de modélisation physique et numérique. Thèse de doctorat sous la direction de S. Bouissou & A. Chemanda, Nice: Université Nice-Sophia-Antipolis.

**Bois, T., Bouissou, S., & Jaboyedoff, M. (2012).** Influence of structural heterogeneities and of large scale topography on imbricate gravitational rock slope failures : New insights from 3-D physical modeling and geomorphological analysis. *Tectonophysics*, 526-529, 147-156.

**Bonci, L., Calcaterra, S., Cesi, C., Gambino, P., Gullà, G., Niceforo, D., . . . Sorisso-Valvo, M. (2010).** Displacements on a slope affected by Deep-Seated Gravitational Slope Deformation: Greci slope (Lago, Calabria, Italy). *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 33, 141-153.

**Booth, A., Dehls, J., Eiken, T., Fischer, L., Hermanns, R., & Oppikofer, T. (2015).** Integrating diverse geologic and geodetic observations to determine failure mechanisms and deformation rates across a large bedrock landslide complex: the Osmundneset landslide, Sogn og Fjordane, Norway. *Landslides*, 12(4), 745-756.

**Boulton, N., Stead, D., Schwab, J., & Geertsema, M. (2006).** The Zymoetz River rock avalanche, June 2002, British Columbia, Canada. *Engineering Geology*, 83(1-3), 76-93.

**Bovis, M., & Evans, S. (1995).** Rock slope movements along the Mount Currie "fault scarp", southern Coast Mountains, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 32(12), 2015-2020.

**BRGM. (2017, Mai).** Sismicité historique de la France Métropole. Récupéré sur SisFrance: <http://www.sisfrance.net/>

**BRGM. (2017, Septembre).** Zonage sismique de la France. Récupéré sur <http://www.planseisme.fr/Zonage-sismique-de-la-France.html>

**Brideau, M.-A., Stead, D., & Couture, R. (2006).** Structural and engineering geology of the East Gate Landslide, Purcell Mountains, British Columbia, Canada. *Engineering Geology*, 84(3-4), 183-206.

**Brideau, M.-A., Stead, D., Kinakin, D., & Fecova, K. (2005).** Influence of tectonic structures on the Hope Slide, British Columbia, Canada. *Engineering Geology*, 80(3-4), 242-259.

**Brückl, E., & Parotidis, M. (2005).** Prediction of slope instabilities due to deep-seated gravitational creep. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(2), 155-172.

**Brückl, E., Brunner, F., & Kraus, K. (2006).** Kinematics of a deep-seated landslide derived from photogrammetric, GPS and geophysical data. *Engineering Geology*, 88(3-4), 149-159.

**Canérot, J. (1964).** Contribution à l'étude géologique des chaînons nord-pyrénéens compris entre les vallées d'Aspe et d'Ossau. Thèse de doctorat, Toulouse: Université de Toulouse.

**Canérot, J., Majesté-Menjoulas, C., & Ternet, Y. (2004).** Nouvelle interprétation structurale de la « faille Nord- Pyrénéenne » en vallée d'Aspe (Pyrénées-Atlantiques). Remise en question d'un plutonisme ophitique danien dans le secteur de Bedous. *Comptes Rendus Geosciences*, 336(2), 135-142.

**Capderou, M. (2012).** Satellites : de Kepler au GPS (éd. 1). Paris: Springer.

**Capitani, M., Ribolini, A., & Federici, P. (2013).** Influence of deep-seated gravitational slope deformations on landslide distributions: a statistical approach. *Geomorphology*, 201, 127-134.

**Carbonel, D., Gutiérrez, F., Linares, R., Roqué, C., Zarroca, M., McCalpin, J., . . . Rodríguez, V. (2013).** Differentiating between gravitational and tectonic faults by means of geomorphological mapping, trenching and geophysical surveys. The case of the Zenzano Fault (Iberian Chain, N Spain). *Geomorphology*, 189, 93-108.

**Carobene, L., & Cevasco, A. (2011).** A large scale lateral spreading, its genesis and Quaternary evolution in the coastal sector between Cogoleto and Varazze (Liguria — Italy). *Geomorphology*, 129(3-4), 398-411.

**Casson, B. (2004).** Apports de l'imagerie optique haute résolution pour l'étude 3D des glissements de terrain. Thèse de doctorat sous la direction de P. Allemand & C. Delacourt, Lyon: Université Claude Bernard.

**Castéras, M., Mirouse, M., & Souquet, P. (1969).** Carte géologique de la France (1/80 000), feuille Urdos (250) (éd. 2e). Orléans: BRGM.

**CATNAT. (2017, Mars).** Observatoire permanent des catastrophes naturelles et des risques naturels. Récupéré sur <https://www.catnat.net/>

**Causse, L. (2015).** Analyse et modélisation des interactions géomécaniques entre tunnels anciens et versants instables. Thèse de doctorat sous la direction de R. Cojean & J.-A. Fleurisson, Paris: École nationale supérieure des mines de Paris.

**Chigira, M. (1992).** Long-term gravitational deformation of rocks by mass rock creep. *Engineering Geology*, 32(3), 157-184.

**Chigira, M. (2009).** September 2005 rain-induced catastrophic rockslides on slopes affected by deep-seated gravitational deformations, Kyushu, southern Japan. *Engineering Geology*, 108(1-2), 1-15.

**Chigira, M., Hariyama, T., & Yamasaki, S. (2013).** Development of deep-seated gravitational slope deformation on a shale dip-slope: Observations from high-quality drill cores. *Tectonophysics*, 605, 104-113.

**Chigira, M., Wang, W.-N., Furuya, T., & Kamai, T. (2003).** Geological causes and geomorphological precursors of the Tsaoling landslide triggered by the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan. *Engineering Geology*, 68(3-4), 259-273.

**Chigira, M., Wu, X., Inokuchi, T., & Wang, G. (2010).** Landslides induced by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China. *Geomorphology*, 118(3-4), 225-238.

**Choukroune, P. (1992).** Tectonic Evolution of the Pyrenees. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 20, 143-158.

**Colas, G., & Pilot, G. (1976).** Description et classification des glissements de terrain. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, Numéro spécial, 21-30.

**Colesanti, C., & Wasowski, J. (2006).** Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Engineering Geology*, 88(3-4), 173-199.

**Coltorti, M., Dramis, F., Gentili, B., Pambianchi, G., Crescenti, U., & Sorriso-Valvo, M. (1985).** The december 1982 Ancona landslide: A case of deep-seated gravitational slope deformation evolving at unsteady rate. *Zeitschrift fuer Geomorphologie N. F.*, 29(3), 335-345.

**Conti, S., & Tosatti, G. (1996).** Tectonic vs gravitational processes affecting Ligurian and Epilugurian units in the Marecchia valley (Northern Apennines). *Memorie di Scienze Geologiche*, 48, 107-142.

**Coquin, J., Mercier, D., Bourgeois, O., Cossart, E., & Decaulne, A. (2015).** Gravitational spreading of mountain ridges coeval with Late Weichselian deglaciation: impact on glacial landscapes in Tröllaskagi, northern Iceland. *Quaternary Science Reviews*, 107, 197-213.

**Crosta, G., & Agliardi, F. (2002).** How to obtain alert velocity thresholds for large rockslides. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27(36), 1557-1565.

**Crosta, G., & Zanchi, A. (2000).** Deep Seated Slope Deformations: Huge, Extraordinary, Enigmatic Phenomena. Dans E. Bromhead, N. Dixon, & M.-L. Ibsen (Éds.), *Landslides in Research, Theory and Practice* (pp. 351-358). London: Thomas Telford.

**Crosta, G., Agliardi, F., Frattini, P., & Zanchi, A. (2008).** Alpine inventory of Deep-Seated Gravitational Slope Deformations. Vienne: European Geosciences Union.

**Crosta, G., Chen, H., & Lee, C. (2004).** Replay of the 1987 Val Pola Landslide, Italian Alps. *Geomorphology*, 60(1-2), 127-146.

**Crosta, G., Di Prisco, C., Frattini, P., Frigerio, G., Castellanza, R., & Agliardi, F. (2014).** Chasing a complete understanding of the triggering mechanisms of a large rapidly evolving rockslide. *Landslides*, 11(5), 747-764.

**Crosta, G., Frattini, P., & Agliardi, F. (2013).** Deep seated gravitational slope deformations in the European Alps. *Tectonophysics*, 605, 13-33.

**Cruden, D., & Martin, C. (2007).** Before the Frank Slide. *Revue canadienne de géotechnique*, 44(7), 765-780.

**Cruden, D., & Varnes, D. (1996).** Landslide Types and Processes. Dans A. Keith Turner, & R. Schuster (Éds.), *Landslides : Investigation and Mitigation* (pp. 36-75). Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Special Report 247.

**Debon, F., Enrique, P., & Autran, A. (1995).** Magmastisme hercynien. Dans A. Barnolas, & J. Chiron, *Synthèse géologique et géophysique des Pyrénées*, volume 1 (pp. 361-499). Orléans: BRGM.

**Del Ventisette, C., Righini, G., Moretti, S., & Casagli, N. (2014).** Multitemporal landslides inventory map updating using spaceborne SAR analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 30, 238-246.

**Delacourt, C., Allemand, P., Berthier, E., Raucoules, D., Casson, B., Grandjean, P., . . . Varel, E. (2007).** Remote-sensing techniques for analysing landslide kinematics: a review. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 178(2), 89-100.

**Delfaud, J., Del Valle, J., & Le Pochat, G. (1980).** Le Bassin d'Aquitaine et sa marge pyrénéenne. *Bulletin des Centres de Recherches Exploration et Production Elf Aquitaine*, 3, 81-86.

**Deramond, J., & Joseph, J. (1972).** Formation d'une schistosité par rejeu d'une surface antérieure d'anisotropie : exemple du Paléozoïque de la nappe de Gavarnie (Haute-Pyrénées). Paris: C.R. Acad. Sc., t. 274, pp. 2149-2152.

**Di Luzio, E., Saroli, M., Esposito, C., Bianchi-Fasani, G., Cavinato, G., & Scarascia-Mugnozza, G. (2004).** Influence of structural framework on mountain slope deformation in the Maiella anticline (Central Apennines, Italy). *Geomorphology*, 60(3-4), 417-432.

**Di Maggio, C., Madonia, G., & Vattano, M. (2014).** Deep-seated gravitational slope deformations in western Sicily: Controlling factors, triggering mechanisms, and morpho-evolutionary models. *Geomorphology*, 208, 173-189.

**Discenza, M., Esposito, C., Martino, S., Petitta, M., Prestininzi, A., & Scarascia Mugnozza, G. (2011).** The gravitational slope deformation of Mt. Rocchetta ridge (central Apennines, Italy): geological-evolutionary model and numerical analysis. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 70(4), 559-575.

**Dramis, F., & Sorisso-Valvo, M. (1983).** Two cases of earthquake-triggered gravitational spreading in Algeria and in Italy. *Rendiconti della Società Geologica Italia*, 6, 7-10.

**Dramis, F., & Sorriso-Valvo, M. (1994).** Deep-seated gravitational slope deformations, related landslides and tectonics. *Engineering Geology*, 38(3-4), 231-243.

**Dufour, J. (2016).** Suivi topographique du glissement de la Pène du Thès (commune de Borce). ONF / R.T.M. 64-65, Service de Restauration des Terrains en Montagne.

**Dunai, T. (2010).** Cosmogenic Nuclides. Principles, Concepts and Applications in the Earth Surface Sciences (éd. 1). Cambridge: Cambridge University Press.

**Duquenne, F., Botton, S., Peyret, F., Bétaille, D., & Willis, P. (2005).** GPS - localisation et navigation par satellites (éd. 2e). Paris: Lavoisier.

**EDF. (1949).** Baralet - Nouvelle galerie - Feuille de visites. Borce, France: EDF (exploitation usines hydrauliques).

**EDF. (1950).** Monographie de la galerie d'amenée de la centrale du Baralet. Borce, France: EDF (exploitation usines hydrauliques).

**EDF. (2015).** Cumuls mensuels de précipitations au niveau du barrage du Peillhou et du de l'usine hydroélectrique du Baralet entre 1948 et 2010. Tableaux de données (rapport interne).

**El Bedoui, S., Bois, T., Jomard, H., Sanchez, G., Lebourg, T., Trics, E., . . . Pérez, J.-L. (2011).** Paraglacial gravitational deformations in the SW Alps: a review of field investigations,  $^{10}\text{Be}$  cosmogenic dating and physical modelling. Geological Society, London, Special Publications, 351, 11-25.

**El Bedoui, S., Guglielmi, Y., Lebourg, T., & Pérez, J.-L. (2009).** Deep-seated failure propagation in a fractured rock slope over 10,000 years: The La Clapière slope, the south-eastern French Alps. *Geomorphology*, 105(3-4), 232-238.

**Elsevier. (2016, Juillet).** Scopus. Récupéré sur <https://www.elsevier.com/solutions/scopus>

**Esposito, C., Bianchi-Fasani, G., Martino, S., & Scarascia-Mugnozza, G. (2013).** Quaternary gravitational morpho-genesis of Central Apennines (Italy): Insights from the Mt. Genzana case history. *Tectonophysics*, 605, 96-103.

**Fabre, R., Desreumaux, C., & Lebourg, T. (2000).** Les glissements rocheux du versant sud du Layens (Vallee d'Aspe, Pyrenees occidentales). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 171(4), 407-418.

**Fabre, R., Lebourg, T., & Clement, B. (2002).** Typologie et modèles de glissements de terrain : exemples de sites des Pyrénées occidentales et centrales. *Revue française de géotechnique*, 99, 35-47.

**Fabre, R., Texier, J.-P., Clément, B., & Lebourg, T. (2003).** Méthode de localisation des moraines de convergence dans une ancienne vallée glaciaire (Pyrénées, France) : conséquences sur les instabilités des moraines et reconstruction des glaciers au Würm. *Revue canadienne de géotechnique*, 40(2), 419-434.

**Fabre, R., Thomas, A., & Lebourg, T. (2016).** Les mouvements gravitaires fossiles des Pyrénées : exemple en vallée d'Aspe. *Processus gravitaires en masse actuels et fossiles. Initiation, transport, dépôts* (pp. 7-9). Université de Bordeaux, Talence: Atelier thématique ASF-SGF (6 et 7 juin).

**Flageolet. (1989).** Les mouvements de terrain et leur prévention. Paris: Masson.

**Forno, M., Gattiglio, M., Gianotti, F., Guerreschi, A., & Raiteri, L. (2013).** Deep-seated gravitational slope deformations as possible suitable locations for prehistoric human settlements: An example from the Italian Western Alps. *Quaternary International*, 303, 180-190.

**Froese, C., Moreno, F., Jaboyedoff, M., & Cruden, D. (2009).** 25 years of movement monitoring on South Peak, Turtle Mountain: understanding the hazard. *Canadian Geotechnical Journal*, 46(3), 256-269.

**Geertsema, M., Hungr, O., Schwab, J., & Evans, S. (2006).** A large rockslide–debris avalanche in cohesive soil at Pink Mountain, northeastern British Columbia, Canada. *Engineering Geology*, 83(1-3), 64-75.

**Geonics. (1979).** *Operating manual for VLF - EM 16*. Mississauga, Ontario, Canada: Geonics Limited.

**Geoval. (2017, Mai).** Principales formations des zones Nord et Centre Pyrénéennes (vallée d'Aspe & vallée d'Ossau). Récupéré sur [www.geoval.fr: http://www.geoval.fr/images/Geoval/documentation/pyr\\_strat\\_chart.pdf](http://www.geoval.fr/images/Geoval/documentation/pyr_strat_chart.pdf)

**Gilbert, J., Bickle, M., & Chapman, H. (1994).** The origin of Pyrenean Hercynian volcanic rocks (France-Spain): REE and Sm-Nd isotope constraints. *Chemical Geology*, 111(1-4), 207-226.

**Gili, J., Corominas, J., & Rius, J. (2000).** Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring. *Engineering Geology*, 55(3), 167-192.

**Guallini, L., Brozzetti, F., & Marinangeli, L. (2012).** Large-scale deformational systems in the South Polar layered deposits (Promethei Lingula, Mars): "Soft-sediment" and Deep-Seated Gravitational Slope Deformations Mechanisms. *Icarus*, 220(2), 821-843.

**Guglielmi, Y., & Cappa, F. (2010).** Regional-scale relief evolution and large landslides: Insights from geomechanical analyses in the Tinée Valley (southern French Alps). *Geomorphology*, 117(1-2), 121-129.

**Gutiérrez, F., Carbonel, D., Guerrero, J., McCalpin, J., Linares, R., Roqué, C., & Zarroca, M. (2012b).** Late Holocene episodic displacement on fault scarps related to interstratal dissolution of evaporites (Teruel Neogene Graben, NE Spain). *Journal of Structural Geology*, 34, 2-19.

**Gutiérrez, F., Linares, R., Roqué, C., Zarroca, M., Rosell, J., & Galve, J. C. (2012a).** Investigating gravitational grabens related to lateral spreading and evaporite dissolution subsidence by means of detailed mapping, trenching, and electrical resistivity tomography (Spanish Pyrenees). *Lithosphere*, 4(4), 331-353.

**Gutiérrez, F., Ortuño, M., Lucha, P., Guerrero, J., Acosta, E., Coratza, P., . . . Soldati, M. (2008).** Late Quaternary episodic displacement on a sackung scarp in the central Spanish Pyrenees. Secondary paleoseismic evidence? *Geodinamica Acta*, 21(4), 187-202.

**Gutiérrez-Santolalla, F., Acosta, E., Rios, S., Guerrero, J., & Lucha, P. (2005).** Geomorphology and geochronology of sackung features (uphill-facing scarps) in the Central Spanish Pyrenees. *Geomorphology*, 69(1-4), 298-314.

**Hasler, A., Gruber, S., & Beutel, J. (2012).** Kinematics of steep bedrock permafrost. *Journal of Geophysical Research*, 117(F01016), 1-17.

**Heim, A. (1932).** *Bergsturz und Menschenleben* (Landslides and human lives). Zurich: Fretz & Wasmuth.

**Hermanns, R., Oppikofer, T., Dahle, H., Eiken, T., Ivy-Ochs, S., & Blikra, L. (2013).** Understanding long-term slope deformation for stability assessment of rock slopes: the case of the Oppstadhornet rockslide, Norway. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 6, 255-264.

**Hewitt, K., Clague, J., & Orwin, J. (2008).** Legacies of catastrophic rock slope failures in mountain landscapes. *Earth-Science Reviews*, 87(1-2), 1-38.

**Hippolyte, J., Bourlès, D., Braucher, R., Carcaillet, J., Léanni, L., Arnold, M., & Aumaitre, G. (2009).** Cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  dating of a sackung and its faulted rock glaciers, in the Alps of Savoy (France). *Geomorphology*, 108(3-4), 312-320.

**Hippolyte, J., Brocard, G., Tardy, M., Nicoud, G., Bourlès, D., Braucher, R., . . . Souffaché, B. (2006).** The recent fault scarps of the Western Alps (France): Tectonic surface ruptures or gravitational sackung scarps? A combined mapping, geomorphic, levelling, and  $^{10}\text{Be}$  dating approach. *Tectonophysics*, 418(3-4), 255-276.

**Hippolyte, J.-C., Bourlès, D., Léanni, L., Braucher, R., Chauvet, F., & Lebatard, A. (2012).**  $^{10}\text{Be}$  ages reveal >12 ka of gravitational movement in a major sackung of the Western Alps (France). *Geomorphology*, 171-172, 139-153.

**Holm, K., Bovis, M., & Jakob, M. (2004).** The landslide response of alpine basins to post-Little Ice Age glacial thinning and retreat in southwestern British Columbia. *Geomorphology*, 57(3-4), 201-216.

**Honoré, L., Courboulex, F., & Souriau, A. (2011).** Ground motion simulations of a major historical earthquake (1660) in the French Pyrenees using recent moderate size earthquakes. *Geophysical Journal International*, 187, 1001-1018.

**Hou, Y., Chigira, M., & Tsou, C.-Y. (2014).** Numerical study on deep-seated gravitational slope deformation in a shale-dominated dip slope due to river incision. *Engineering Geology*, 179, 59-75.

**Hugenholtz, C., Whitehead, K., Brown, O., Barchyn, T., Moorman, B., LeClair, A., . . . Hamilton, T. (2013).** Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model. *Geomorphology*, 194, 16-24.

**Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014).** The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167-194.

**Hürlimann, M., Ledesma, A., Corominas, J., & Prat, P. (2006).** The deep-seated slope deformation at Encampadana, Andorra: Representation of morphologic features by numerical modelling. *Engineering Geology*, 83(4), 343-357.

**Hutchinson, J. (1988).** Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. Dans C. Bonnard (Éd.), *Proceedings of the 5th*

International Symposium on Landslides, Lausanne (pp. 3-35). Rotterdam, Pays-Bas: A.A. Balkema.

**IGN. (2016, Mars).** BD Ortho 2012 : Massif de la Cristallère. Récupéré sur <http://professionnels.ign.fr/orthoimages>

**IGN. (2017).** Carte topographique 1547 OT : Ossau, Vallée d'Aspe, Parc National des Pyrénées ( 1/25000).

**IGN. (2017, Mars).** Réseau GNSS Permanent. Récupéré sur <http://rgp.ign.fr/>

**Jaboyedoff, M., Couture, R., & Locat, P. (2009).** Structural analysis of Turtle Mountain (Alberta) using digital elevation model: Toward a progressive failure. *Geomorphology*, 103(1), 5-16.

**Jarman, D. (2006).** Large rock slope failures in the Highlands of Scotland: Characterisation, causes and spatial distribution. *Engineering Geology*, 83(1-3), 161-182.

**Jarman, D., Calvet, M., Corominas, J., Delmas, M., & Gunnell, Y. (2014).** Large-scale rock slope failures in the eastern Pyrenees: Identifying a sparse but significant population in paraglacial and parafluvial contexts. *Geografiska Annaler - Series A - Physical Geography*, 96(3), 357-391.

**Jibson, R., Harp, E., Schulz, W., & Keefer, D. (2004).** Landslides triggered by the 2002 Denali Fault, Alaska, earthquake and the inferred nature of the strong shaking. *Earthquake Spectra*, 20(3), 669-691.

**Jomard, H. (2006).** Analyse multi-échelles des déformations gravitaires du Massif de l'Argentera Mercantour. Thèse de doctorat sous la direction de T. Lebourg & E. Tric, Nice: Université Nice-Sophia-Antipolis.

**Jomard, H., Lebourg, T., & Guglielmi, Y. (2014).** Morphological analysis of deep-seated gravitational slope deformation (DSGSD) in the western part of the Argentera massif. A morpho-tectonic control? *Landslides*, 11(1), 107-117.

**Joseph, J. (1973).** Le Paléozoïque de la nappe de Gavarnie entre le cirque de Troumouse et le gave de Pau. Thèse de doctorat, Toulouse: Université de Toulouse.

**Klimeš, J., Rowberry, M., Blahůt, J., Briestenský, M., Hartvich, F., Košťák, B., . . . Štěpančíková, P. (2012).** The monitoring of slow-moving landslides and

assessment of stabilisation measures using an optical-mechanical crack gauge. *Landslides*, 9(3), 407-415.

**Korup, O. (2006).** Effects of large deep-seated landslides on hillslope morphology, Western Southern Alps, New Zealand. *Journal of Geophysical Research*, 111(F01018).

**Košťák, B., & Avramova-Tačeva, E. (1981).** Propagation of coastal slope deformations at Taukliman, Bulgaria. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 23(1), 67-73.

**LCPC. (2004).** *Détection de cavités souterraines par méthodes géophysiques*. Paris: Guide technique Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

**Le Roux, O. (2009).** Caractérisation de l'évolution géomorphologique de la basse vallée de la Romanche en relation avec les instabilités gravitaires de ses versants rocheux: contraintes morphologique, géophysique et géochronologique. Thèse de doctorat sous la direction de D. Jongmans & S. Schwartz, Grenoble: Université Joseph Fourier.

**Le Roux, O., Jongmans, D., Kasperski, J., Schwartz, S., Potherat, P., Lebruc, V., . . . Meric, O. (2011).** Deep geophysical investigation of the large Séchilienne landslide (Western Alps, France) and calibration with geological data. *Engineering Geology*, 120(1-4), 18-31.

**Le Roux, O., Scwartz, S., Gamond, J., Jongmans, D., Bourles, D., Braucher, R., . . . Leanni, L. (2009).** CRE dating on the head scarp of a major landslide (Séchilienne, French Alps), age constraints on Holocene kinematics. *Earth and Planetary Science Letters*, 280(1-4), 236-245.

**Lebourg, T. (2000).** Analyse géologique et mécanique de glissements de terrain dans des moraines des Pyrénées centrales et occidentales (France). Thèse de doctorat sous la direction de B. Clement, Bordeaux: Université Bordeaux I.

**Lebourg, T., Fabre, R., Clement, B., & Frappa, M. (2003).** High-mountain landslides in the Atlantic Pyrenees: their relationship with the geology and geomorphology. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 62(3), 221-229.

**Lebourg, T., Hernandez, M., Jomard, H., El Bedoui, S., Bois, T., Zerathe, S., . . . Vidal, M. (2011).** Temporal evolution of weathered cataclastic material in gravitational faults of the La Clapiere deep-seated landslide by mechanical approach. *Landslides*, 8(2), 241-252.

**Lebourg, T., Riss, J., & Pirard, E. (2004).** Influence of morphological characteristics of heterogeneous moraine formations on their mechanical behaviour using image and statistical analysis. *Engineering Geology*, 73(1-2), 37-50.

**Lebourg, T., Zerathe, S., Fabre, R., Giuliano, J., & Vidal, M. (2014).** A late Holocene deep-seated landslide in the northern French Pyrenees. *Geomorphology*, 208, 1-10.

**Lebrouc, V. (2013).** Evolution thermomécanique du mouvement de Séchillienne depuis la dernière phase glaciaire quaternaire. Thèse de doctorat sous la direction de L. Baillet & S. Schwartz, Grenoble: Université de Grenoble.

**Lenti, L., Martino, S., Paciello, A., Prestininzi, A., & Rivellino, S. (2012).** Microseismicity within a karstified rock mass due to cracks and collapses as a tool for risk management. *Natural Hazards*, 64(1), 359-379.

**Loke, M., & Barker, R. (1996).** Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 44, 499-523.

**Mahr, T. (1977).** Deep-reaching gravitational deformations of high mountain slopes. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*(16), 121-127.

**Mahr, T., & Nemçok, A. (1977).** Deep-seated creep deformations in the crystalline cores of the Tatry Mts. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 16(1), 104-106.

**Majesté-Menjoulas, C. (1968).** Le Paléozoïque au Nord du synclinorium des Eaux-Chaudes (Pyrénées-Atlantiques). Thèse de doctorat, Toulouse: Université de Toulouse.

**Malgot, J. (1977).** Deep-seated gravitational slope deformations in neovolcanic mountain ranges of Slovakia. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 16(1), 106-109.

**Massey, C., McSaveney, M., & Davies, T. (2013).** Evolution of an overflow channel across the Young River landslide dam, New Zealand. Dans C. Margottini, P. Canuti, & K. Sassa (Éds.), *Landslide Science and Practice*, Volume 6 (pp. 43-49). New-York: Springer.

**McCalpin, J., Bruhn, R., Pavlis, T., Gutierrez, F., Guerrero, J., & Lucha, P. (2011).** Antislope scarps, gravitational spreading, and tectonic faulting in the western Yakutat microplate, south coastal Alaska. *Geosphere*, 7(5), 1143-1158.

**McLean, M., Brideau, M., & Augustinus, P. (2015).** Deep-Seated Gravitational Slope Deformation in Greywacke Rocks of the Tararua Range, North Island, New Zealand. Dans G. Lollino, D. Giordan, G. Crosta, J. Corominas, R. Azzam, J. Wasowski, & N. Sciarra (Éds.), *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2* (pp. 559-564). Cham: Springer.

**Mège, D., & Bourgeois, O. (2011).** Equatorial glaciations on Mars revealed by gravitational collapse of Valles Marineris wallslopes. *Earth and Planetary Science Letters*, 310(3-4), 182-191.

**Mège, D., Le Deit, L., Rango, T., & Korme, T. (2013).** Gravity tectonics of topographic ridges: Halokinesis and gravitational spreading in the western Ogaden, Ethiopia. *Geomorphology*, 193, 1-13.

**MétéoFrance. (2017, Septembre).** Cumuls mensuels de précipitations au niveau de la station codée 64542006 Urdos RN134 entre janvier 2010 et juin 2016. Récupéré sur <https://donneespubliques.meteofrance.fr/>

**Millies-Lacroix, A. (1981).** Classification des talus et versants instables. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, Numéro spécial, 55-62.

**Mirouse, R. (1966).** Recherches géologiques dans la partie occidentale de la zone primaire axiale des Pyrénées. Thèse de doctorat, Toulouse: Université de Toulouse.

**Moro, M., Saroli, M., Salvi, S., Stramondo, S., & Doumaz, F. (2007).** The relationship between seismic deformation and deep-seated gravitational movements during the 1997 Umbria-Marche (Central Italy) earthquakes. *Geomorphology*, 89(3-4), 297-307.

**Moro, M., Saroli, M., Tolomei, C., & Salvi, S. (2009).** Insights on the kinematics of deep-seated gravitational slope deformations along the 1915 Avezzano earthquake fault (Central Italy), from time-series DInSAR. *Geomorphology*, 112(3-4), 261-276.

**Moser, M. (1996).** The time-dependant behaviour of sagging slopes (talzuschübe). Trondheim: 7th International Symposium on Landslides.

**Muller, J. (1973).** Sur les tectoniques hercyniennes et pyrénéennes dans la partie occidentale de la haute chaîne des Pyrénées entre le Somport et le Pourtalet. Paris: C.R. Acad. Sc., t. 276, pp. 2871-2874.

**Muller, J., & Roger, P. (1977).** L'Évolution structurale des Pyrénées (Domaine central et occidental). Le segment hercynien, la chaîne de fond alpine. *Géologie Alpine*, 53(2), 149-191.

**Nemčok, A. (1972a).** Gravitational slope deformation in high mountains. Montréal: 24th International Geological Congress.

**Nemčok, A. (1982).** Zosuvy v slovenských Karpatoch (Landslides in the Slovak Carpathians) (éd. 1). Bratislava: Veda.

**Nemčok, A., & Baliak, F. (1977).** Gravitational deformations in mesozoic rocks of the carpathian mountain ranges. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 16(1), 109-111.

**Nemčok, A., Pašek, J., & Rybář, J. (1972b).** Classification of landslides and other mass movements. *Rock mechanics*, 4(2), 71-78.

**Niethammer, U., James, M., Rothmund, S., Travelletti, J., & Joswig, M. (2012).** UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. *Engineering Geology*, 128, 2-11.

**Nishii, R., Matsuoka, N., Daimaru, H., & Yasuda, M. (2013).** Precursors and triggers of an alpine rockslide in Japan: the 2004 partial collapse during a snow-melting period. *Landslides*, 10(1), 75-82.

**Palis, E. (2017).** Etude du comportement post-rupture de versants instables par l'observation et l'instrumentation. Thèse de doctorat sous la direction de T. Lebourg & E. Tric, Nice: Université Côte d'Azur.

**Pánek, T. (2015).** Recent progress in landslide dating: A global overview. *Progress in Physical Geography*, 39(2), 168-198.

**Pánek, T., & Klimeš, J. (2016).** Temporal behavior of deep-seated gravitational slope deformations: A review. *Earth-Science Reviews*, 156, 14-38.

**Pánek, T., Hradecký, J., Minár, J., Hungr, O., & Dušek, R. (2009a).** Late Holocene catastrophic slope collapse affected by deep-seated gravitational deformation in flysch: Ropice Mountain, Czech Republic. *Geomorphology*, 103(3), 414-429.

**Pánek, T., Hradecký, J., Šilhán, K., Smolková, V., & Altová, V. (2009b).** Time constraints for the evolution of a large slope collapse in karstified mountainous terrain of the southwestern Crimean Mountains, Ukraine. *Geomorphology*, 108(3-4), 171-181.

**Pánek, T., Mentlík, P., Ditchburn, B., Zondervan, A., Norton, K., & Hradecký, J. (2015).** Are sackungen diagnostic features of (de)glaciated mountains? *Geomorphology*, 248, 396-410.

**Pánek, T., Šilhán, K., Tábořík, P., Hradecký, J., Smolková, V., Lenart, J., . . . Pazdur, A. (2011a).** Catastrophic slope failure and its origins: case of the May 2010 Girová Mountain long-runout rockslide (Czech Republic). *Geomorphology*(130), 352-364.

**Pánek, T., Smolková, V., Hradecký, J., Baroň, I., & Šilhán, K. (2013).** Holocene reactivations of catastrophic complex flow-like landslides in the Flysch Carpathians (Czech Republic/Slovakia). *Quaternary Research*, 80(1), 33-46.

**Pánek, T., Tábořík, P., Klimeš, J., Komárková, V., Hradecký, J., & Šťastný, M. (2011b).** Deep-seated gravitational slope deformations in the highest parts of the Czech Flysch Carpathians: Evolutionary model based on kinematic analysis, electrical imaging and trenching. *Geomorphology*, 129(1-2), 92-112.

**Paronuzzi, P., & Bolla, A. (2012).** The prehistoric Vajont rockslide: An updated geological model. *Geomorphology*, 169-170, 165-191.

**Pašek, J. (1974).** Gravitational block-type movements. São Paulo: 2nd International Geological Congress.

**Pasuto, A., & Soldati, M. (1996).** Rock spreading. Dans R. Dikau, D. Brundsen, L. Schrott, & M.-L. Ibsen (Éds.), *Landslide Recognition : Identification, Movement and Causes* (pp. 122-136). Chichester: Wiley.

**Pedrazzini, A., Jaboyedoff, M., Loye, A., & Derron, M.-H. (2013).** From deep seated slope deformation to rock avalanche: Destabilization and transportation models of the Sierre landslide (Switzerland). *Tectonophysics*, 605, 149-168.

**Plandé, R. (1929).** L'utilisation industrielle de la vallée d'Aspe (Pyrénées occidentales). *Revue de géographie alpine*, 17(1), 41-54.

**Pollet, N. (2004).** Mouvements gravitaires rapides de grandes masses rocheuses : apports des observations de terrain à la compréhension des processus de propagation et dépôt.

Application aux cas de La Madelaine (Savoie), Flims (Grisons, Suisse) et Köfels (Tyrol, Autriche). Thèse de doctorat sous la direction de R. Cojean, Champs-sur-Marne: École Nationale des Ponts et Chaussées.

**Radbruch-Hall, D. (1978).** Gravitational creep on rock masses on slopes. Dans B. Voight (Éd.), *Rockslides and avalanches. Natural Phenomena* (pp. 607-675). Amsterdam: Elsevier.

**Radbruch-Hall, D., Varnes, D., & Savage, W. (1976).** Gravitational spreading of steep-sided ridges ("sackung") in Western United States. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 13(1), 23-35.

**RéNaSS. (2017, Mai).** Catalogue des événements sismique. Récupéré sur <http://renass.unistra.fr/recherche>

**Rizzo, V., & Leggeri, M. (2004).** Slope instability and sagging reactivation at Maratea (Potenza, Basilicata, Italy). *Engineering Geology*, 71(3-4), 181-198.

**Sakals, M., Geertsema, M., Schwab, J., & Foord, V. (2012).** The Todagin Creek landslide of October 3, 2006, Northwest British Columbia, Canada. *Landslides*, 9(1), 107-115.

**Sanchez, G., Rolland, Y., Corsini, M., Braucher, R., Bourlès, D., Arnold, M., & Aumaître, G. (2010).** Relationships between tectonics, slope instability and climate change: Cosmic ray exposure dating of active faults, landslides and glacial surfaces in the SW Alps. *Geomorphology*, 117(1-2), 1-13.

**Savage, W., & Varnes, D. (1987).** Mechanics of gravitational spreading of steep-sided ridges («sackung»). *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 35(1), 31-36.

**Schlögel, R., Malet, J.-P., Doubre, C., & Lebourg, T. (2016).** Structural control on the kinematics of the deep-seated La Clapière landslide revealed by L-band InSAR observations. *Landslides*, 13(5), 1005-1018.

**Schmutz, M. (2000).** *Apport des méthodes géophysiques à la connaissance des glissements-coulées développés dans les marnes noires. Application à Super Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, France)*. Thèse de doctorat sous la direction de M. Mietton, O. Maquaire et J.J. Schott, Strasbourg: Université Louis Pasteur.

**SenseFly. (2014).** eBee - Extended user manual (revision 13). Cheseaux-Lausanne: senseFly.

**Soldati, M. (2013).** Deep-seated Gravitational Slope Deformation. Dans P. Bobrowsky (Éd.), *Encyclopedia of Natural Hazards* (pp. 151-155). Dordrecht: Springer.

**Souriau, A., Rigo, A., Sylvander, M., Benahmed, S., & Grimaud, F. (2014).** Seismicity in central-western Pyrenees (France): A consequence of the subsidence of dense exhumed bodies. *Tectonophysics*, 621, 123-131.

**Strozzi, T., Ambrosi, C., & Raetzo, H. (2013).** Interpretation of Aerial Photographs and Satellite SAR Interferometry for the Inventory of Landslides. *Remote Sensing*, 5(5), 2554-2570.

**Tamburini, A., Del Conte, S., Larini, G., Lopardo, L., Malaguti, C., & Vescovi, P. (2013).** Application of SqueeSAR™ to the Characterization of Deep Seated Gravitational Slope Deformations: The Berceto Case Study (Parma, Italy). Dans C. Margottini, P. Canuti, & K. Sassa (Éds.), *Landslide Science and Practice, Volume 2: Early Warning, Instrumentation and Monitoring* (pp. 437-443). New York, États-Unis: Springer.

**Ternet, Y., Barrère, P., Canérot, J., & Majesté-Menjoulàs, C. (2003).** Carte géologique France (1/50 000), feuille Laruns-Somport (1069). Orléans, France : BRGM.

**Ternet, Y., Majesté-Menjoulàs, C., Canérot, J., Baudin, T., Cocherie, A., Guerrot, C., & Rossi, P. (2004).** Notice explicative, Carte géologique France (1/50 000), feuille Laruns-Somport (1069). Orléans, France : BRGM.

**Ter-Stepanian, G. (1966).** Types of Depth Creep of Slopes In Rock Masses. Lisbon: 1st ISRM Congress, International Society for Rock Mechanics.

**Ter-Stepanian, G. (1977).** Deep-reaching gravitational deformation of mountain slopes. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 16(1), 87-94.

**Terzaghi, K. (1950).** Mechanism of landslides. Dans S. Paige (Éd.), *Application of Geology to Engineering Practice* (pp. 83-123). New York: Geological Society of America.

**Thomas, A. (2013).** Caractérisation géomorphométrique d'un versant rocheux affecté par un glissement de grande ampleur et évaluation spatio-temporelle des déplacements à partir d'un Système d'Information Géographique : exemple en Vallée d'Aspe dans les

Pyrénées-Atlantiques. Mémoire de recherche de Master sous la direction de R. Fabre, Talence: Université Bordeaux 1.

**Thomas, A., Hauquin, T., Fabre, R., & Riss, J. (2013).** Analyse de la déstructuration et du comportement d'un massif rocheux affecté par un glissement de grande ampleur (Vallée d'Aspe, Pyrénées-Atlantiques, France). Article + poster. Grenoble: Journées Aléa Gravitaire 2013 (17 et 18 septembre).

**Tolomei, C., Taramelli, A., Moro, M., Saroli, M., Aringoli, D., & Salvi, S. (2013).** Analysis of the deep-seated gravitational slope deformations over Mt. Frascare (Central Italy) with geomorphological assessment and DInSAR approaches. *Geomorphology*, 201, 281-292.

**Trimble. (2016, Juin).** GNSS Planning Online. Récupéré sur <http://www.trimble.com/GNSSPlanningOnline/#/Settings>

**Varnes, D. (1958).** Landslide types and processes. Dans E. Eckel (Éd.), *Landslides and Engineering Practice* (pp. 20-47). Washington, D.C.: Highway Research Board, Special Report 29.

**Varnes, D. (1978).** Slope movement types and processes. Dans R. Schuster, & R. Krizek (Éds.), *Landslides, Analysis and Control* (pp. 11-33). Washington, D.C.: Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Special Report 176.

**Vasuki, Y., Holden, E.-J., Kovesi, P., & Micklethwaite, S. (2014).** Semi-automatic mapping of geological Structures using UAV-based photogrammetric data: An image analysis approach. *Computers & Geosciences*, 69, 22-32.

**Viero, A., Teza, G., Massironi, M., Jaboyedoff, M., & Galgaro, A. (2010).** Laser scanning-based recognition of rotational movements on a deep seated gravitational instability: The Cinque Torri case (North-Eastern Italian Alps). *Geomorphology*, 122(1-2), 191-204.

**Vollgger, S., & Cruden, A. (2016).** Mapping folds and fractures in basement and cover rocks using UAV photogrammetry, Cape Liptrap and Cape Paterson, Victoria, Australia. *Journal of Structural Geology*, 85, 168-187.

**Wang, W.-N., Chigira, M., & Furuya, T. (2003).** Geological and geomorphological precursors of the Chiu-fen-erh-shan landslide triggered by the Chi-chi earthquake in central Taiwan. *Engineering Geology*, 69(1-2), 1-13.

**Yagi, R. (2003).** A review and a proposal of micro-landform classification and mapping in a landslide body: A geomorphological approach to the analysis of landslide development processes. *Chikei*, 24(3), 261-294.

**Yin, Y., Sun, P., Zhu, J., & Yang, S. (2011).** Research on catastrophic rock avalanche at Guanling, Guizhou, China. *Landslides*, 8(4), 517-525.

**Zarroca, M., Linares, R., Bach, J., Roqué, C., Moreno, V., & Font, L. B. (2012).** Integrated geophysics and soil gas profiles as a tool to characterize active. *Environmental earth sciences*, 67(3), 889-910.

**Zerathe, S. (2013).** Origine et évolution des ruptures gravitaires de grande ampleur dans les chaînes subalpines méridionales à l'Holocène : contraintes géomorphologiques, géochronologiques et géophysiques. Thèse de doctorat sous la direction de T. Lebourg, Nice: Université Nice-Sophia Antipolis.

**Zerathe, S., & Lebourg, T. (2012).** Evolution stages of large deep-seated landslides at the front of a subalpine meridional chain (Maritime-Alps, France). *Geomorphology*, 138(1), 390-403.

**Zerathe, S., Braucher, R., Lebourg, T., Bourlès, D., Manetti, M., & Léanni, L. (2013).** Dating chert (diagenetic silica) using in-situ produced  $^{10}\text{Be}$ : Possible complications revealed through a comparison with  $^{36}\text{Cl}$  applied to coexisting limestone. *Quaternary Geochronology*, 17, 81-93.

**Zerathe, S., Lebourg, T., Braucher, R., & Bourlès, D. (2014).** Mid-Holocene cluster of large-scale landslides revealed in the Southwestern Alps by  $^{36}\text{Cl}$  dating. Insight on an Alpine-scale landslide activity. *Quaternary Science Reviews*, 90, 106-127.

**Zhou, J.-W., Cui, P., & Hao, M.-H. (2016).** Comprehensive analyses of the initiation and entrainment processes of the 2000 Yigong catastrophic landslide in Tibet, China. *Landslides*, 13(1), 39-54.

**Zischinsky, U. (1966).** On the Deformation of High Slopes. Lisbon: 1st ISRM Congress, International Society for Rock Mechanics.

**Zischinsky, U. (1969).** Über Sackungen. *Rock mechanics*, 1(1), 30-52.

**ANNEXE. CARNET DE DONNEES : OBSERVATIONS ET MESURES DE  
SURFACE SATELLITAIRE DGNSS (CONSTELLATIONS GPS & GLONASS)**



## Point de référence PR

Tableau A1.1. Coordonnées du point de référence PR avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<i>Méthode de positionnement statique multistations RGP</i>						
1	30/09/2015	411267,346	6194942,715	1632,876	3,8	6,3
2	09/10/2015	411267,354	6194942,717	1632,828	3,9	6,4
3	10/05/2016	411267,356	6194942,703	1632,877	4,5	7,3
4	02/06/2016	411267,362	6194942,670	1632,821	3,5	5,6
5	09/06/2016	411267,362	6194942,690	1632,891	3,3	5,4



Figure A1.1. Évolution en mètres de la composante est (E) du point de référence PR reportée dans le système RGF93 Lambert 93. Vérification de la stabilité de PR par rapport à la position annoncée par l'IGN.



Figure A1.2. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point de référence PR reportée dans le système RGF93 Lambert 93. Vérification de la stabilité de PR par rapport à la position annoncée par l'IGN.

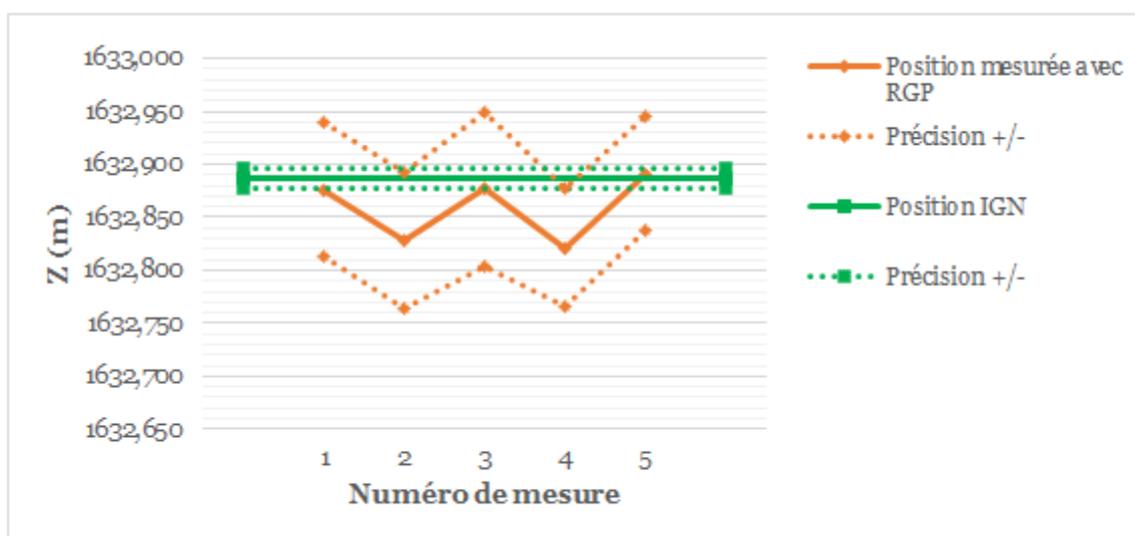


Figure A1.3. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point de référence PR. Vérification de la stabilité de PR par rapport à la position annoncée par l'IGN.

## Point RB1 du réseau de base

Tableau A1.2. Coordonnées du point RB1 du réseau de base avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<i>Méthode de positionnement multistations RGP</i>						
1	01/10/2015	406206,567	6200923,831	1462,802	4,3	6,2
2	16/05/2016	406206,546	6200923,846	1462,791	3,7	5,2
3	03/06/2016	406206,563	6200923,844	1462,787	4,0	5,2
<i>Méthode de positionnement statique pivot PR</i>						
1	01/10/2015	406206,565	6200923,846	1462,814	1,4	2,1
2	16/05/2016	406206,551	6200923,865	1462,804	1,5	2,1
3	03/06/2016	406206,561	6200923,864	1462,792	1,6	1,9

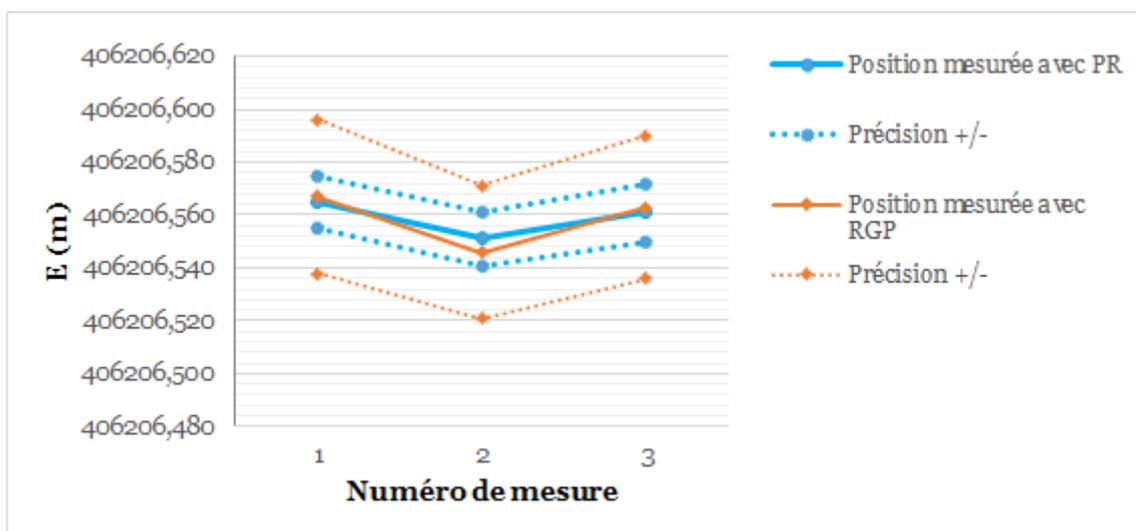


Figure A1.4. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RB1 du réseau de base reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

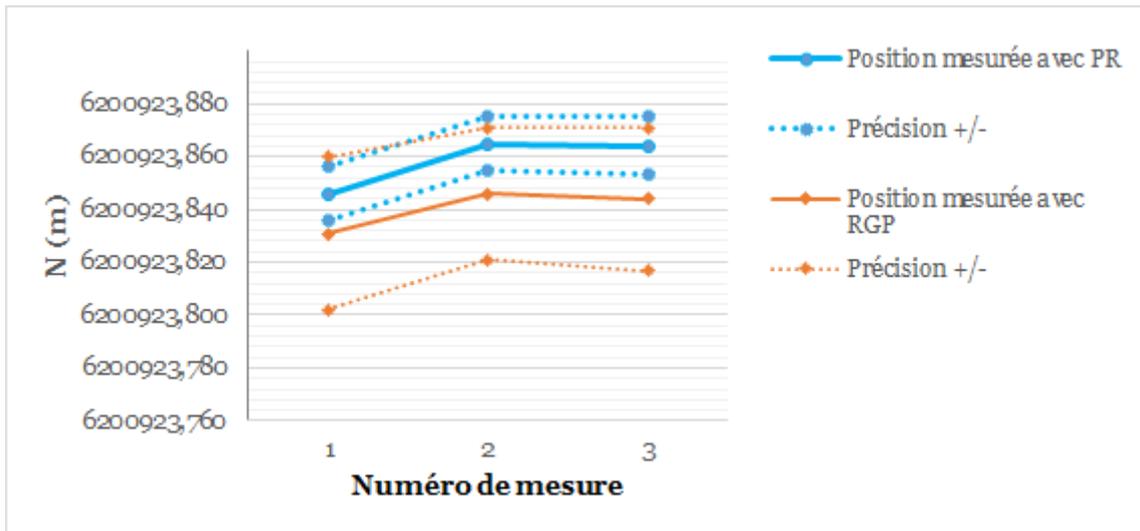


Figure A1.5. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RB1 du réseau de base reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

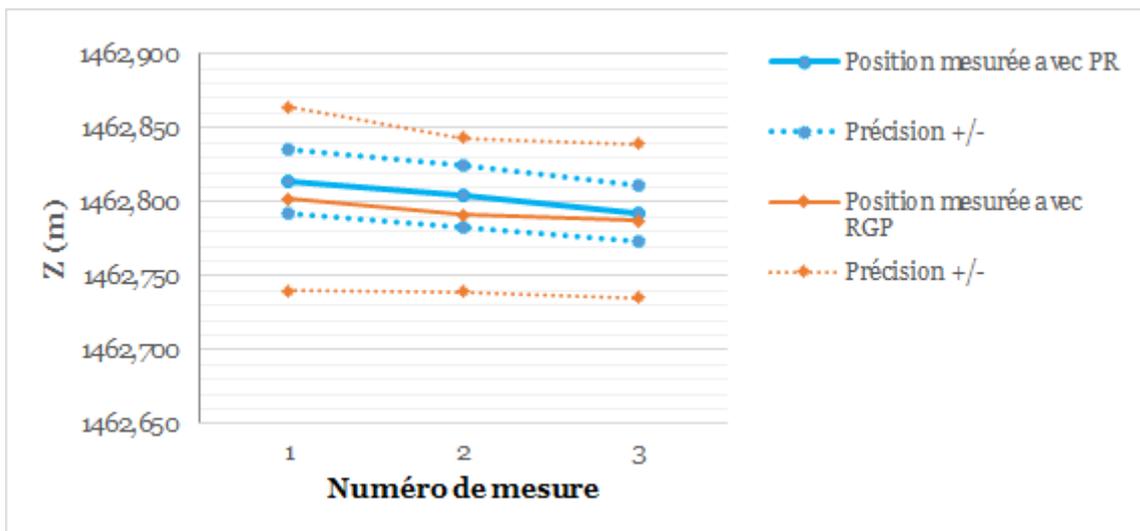


Figure A1.6. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RB1 du réseau de base.

## Point RB2 du réseau de base

Tableau A1.3. Coordonnées du point RB2 du réseau de base avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<u>Méthode de positionnement multistations RGP</u>						
1	01/10/2015	407568,734	6201376,411	1786,117	3,9	6,6
2	16/05/2016	407568,748	6201376,386	1786,098	4,3	5,0
3	03/06/2016	407568,749	6201376,381	1786,093	2,9	5,4
<u>Méthode de positionnement statique pivot PR</u>						
1	01/10/2015	407568,722	6201376,412	1786,136	1,1	1,8
2	16/05/2016	407568,736	6201376,402	1786,133	1,2	1,6
3	03/06/2016	407568,743	6201376,395	1786,124	1,1	2,3

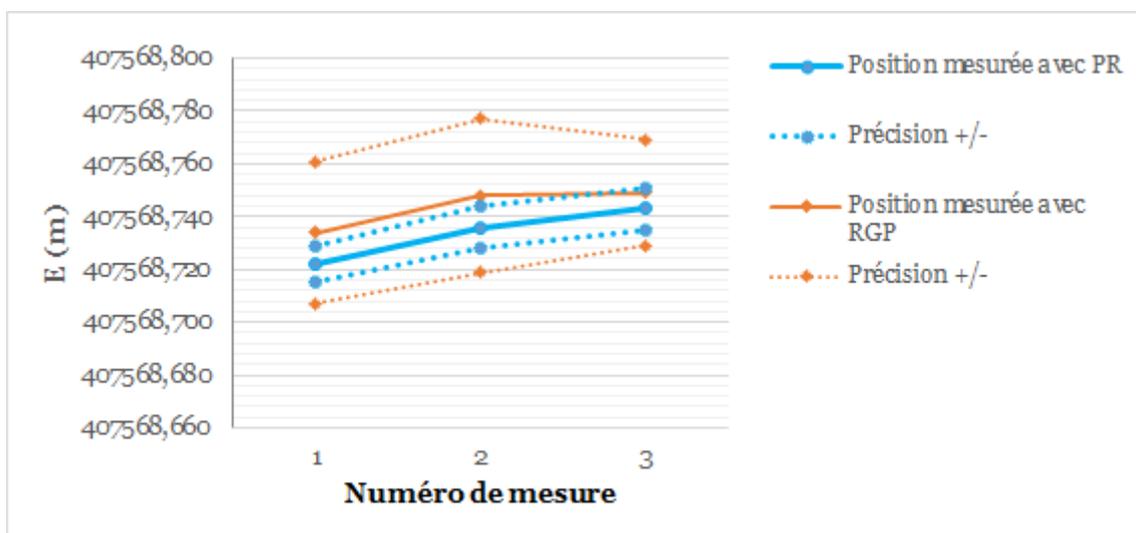


Figure A1.7. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RB2 du réseau de base reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

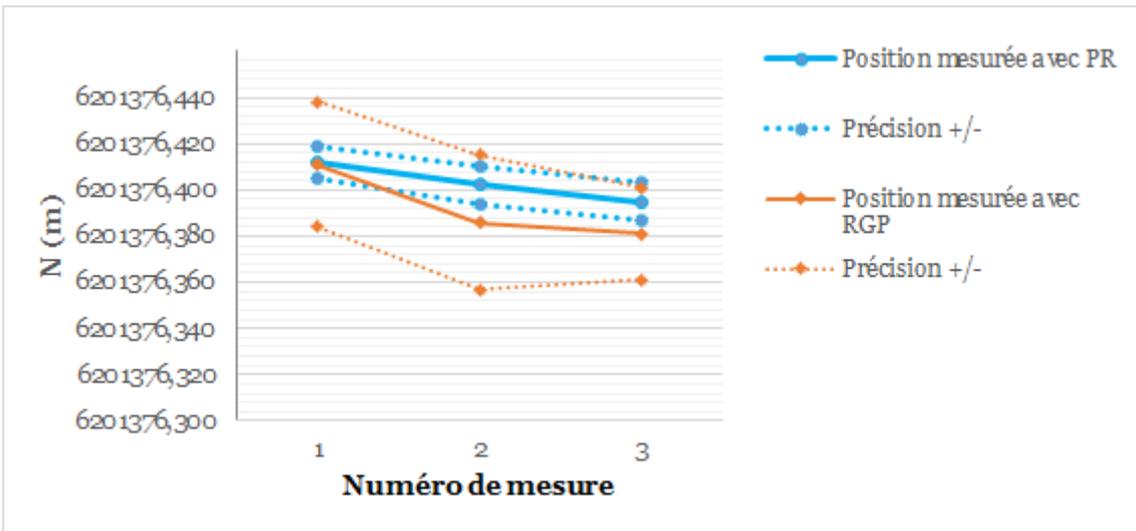


Figure A1.8. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RB2 du réseau de base reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

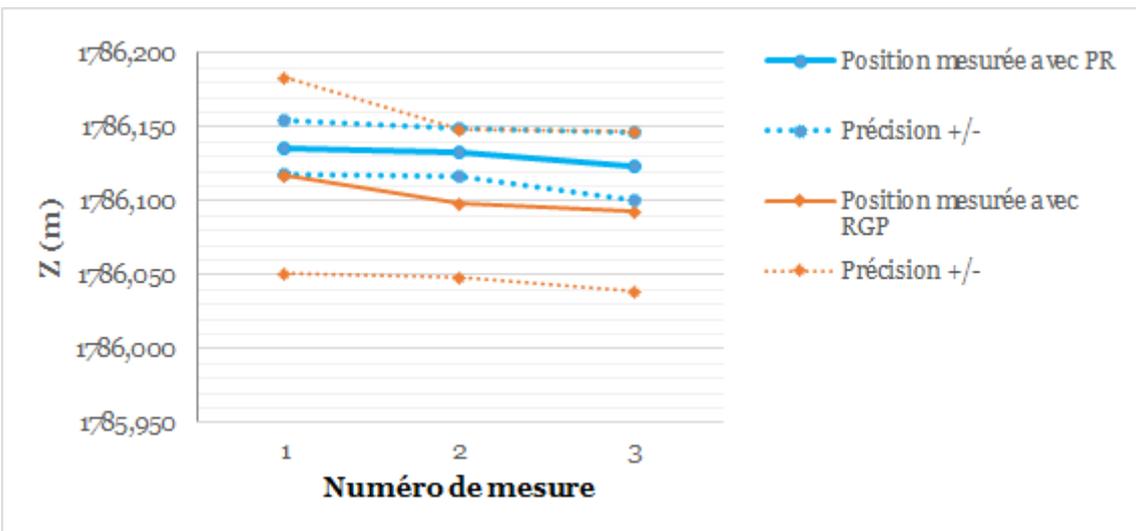


Figure A1.9. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RB2 du réseau de base.

## Point RB3 du réseau de base

Tableau A1.4. Coordonnées du point RB3 du réseau de base avec : (1) la composante est ( $E$ ) et la composante nord ( $N$ ) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 ( $Z$ ) en mètres ; (3) la précision planimétrique ( $dH$ ) et la précision altimétrique ( $dV$ ) en centimètres.

Numéro	Date	$E$ (m)	$N$ (m)	$Z$ (m)	$dH$ (cm)	$dV$ (cm)
<u>Méthode de positionnement multistations RGP</u>						
1	01/10/2015	407545,565	6201382,155	1789,458	3,8	5,9
2	16/05/2016	407545,571	6201382,148	1789,455	3,3	4,7
3	03/06/2016	407545,583	6201382,141	1789,455	3,0	5,9
<u>Méthode de positionnement statique pivot PR</u>						
1	01/10/2015	407545,552	6201382,164	1789,466	1,2	1,8
2	16/05/2016	407545,567	6201382,146	1789,459	1,2	1,7
3	03/06/2016	407545,573	6201382,145	1789,455	1,3	1,8

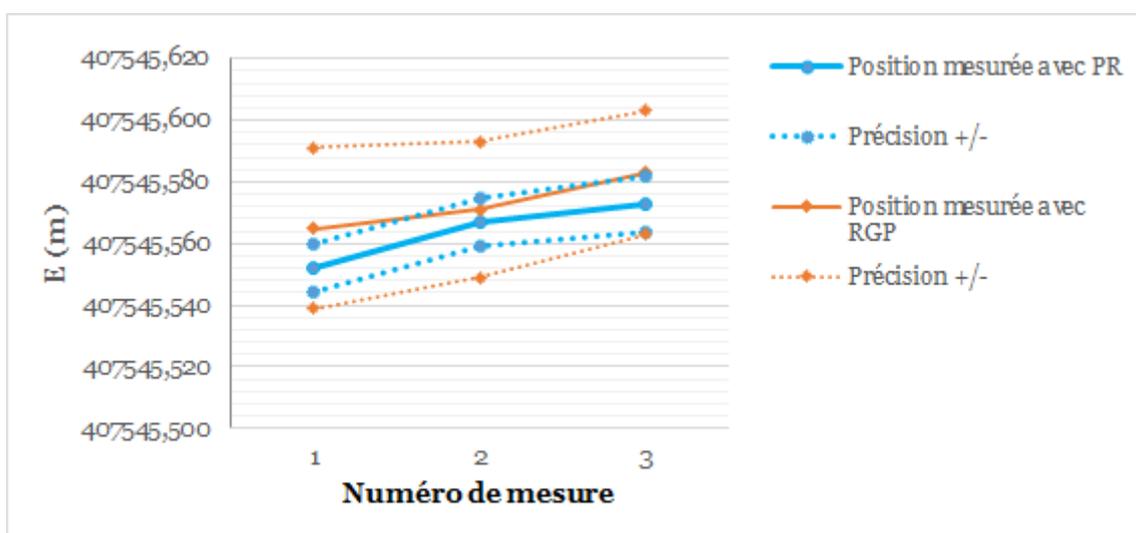


Figure A1.10. Évolution en mètres de la composante est ( $E$ ) du point RB3 du réseau de base reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

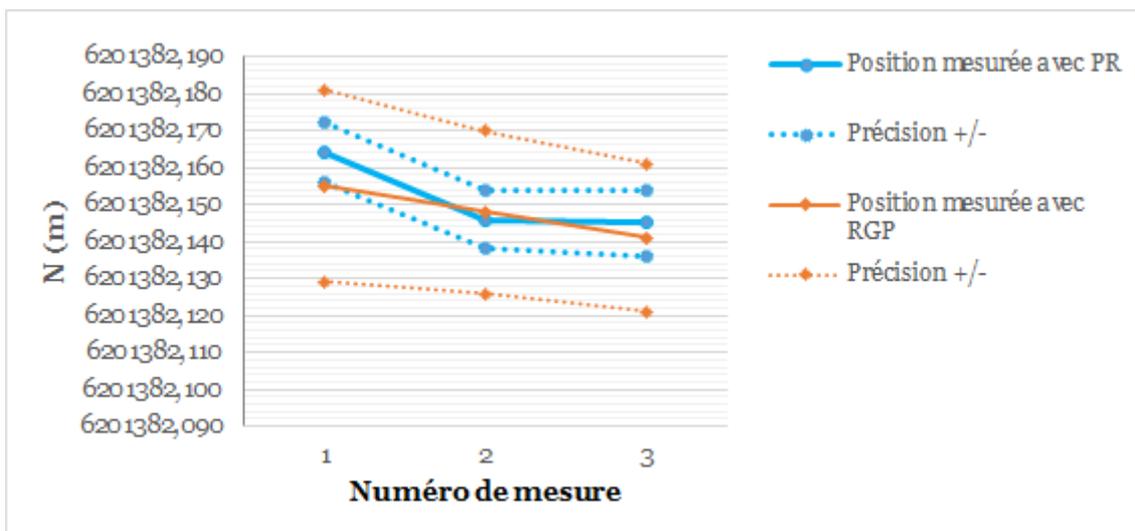


Figure A1.11. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RB3 du réseau de base reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

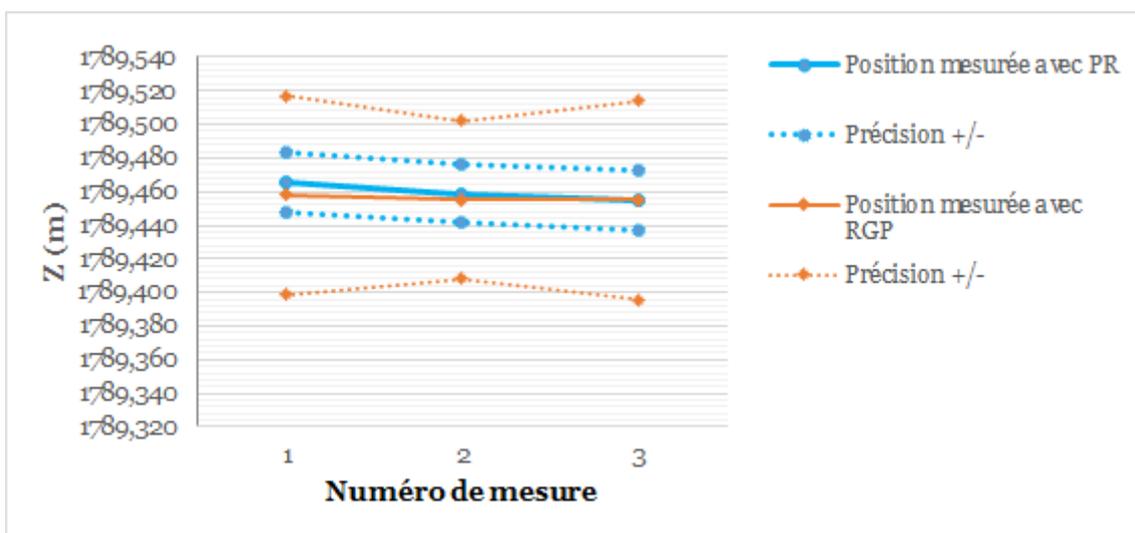


Figure A1.12. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RB3 du réseau de base.

## Point RB4 du réseau de base

Tableau A1.5. Coordonnées du point RB4 du réseau de base avec : (1) la composante est ( $E$ ) et la composante nord ( $N$ ) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 ( $Z$ ) en mètres ; (3) la précision planimétrique ( $dH$ ) et la précision altimétrique ( $dV$ ) en centimètres.

Numéro	Date	$E$ (m)	$N$ (m)	$Z$ (m)	$dH$ (cm)	$dV$ (cm)
<u>Méthode de positionnement multistations RGP</u>						
1	01/10/2015	409006,721	6203512,952	818,081	3,9	5,6
2	16/05/2016	409006,729	6203512,956	818,096	2,8	5,4
3	03/06/2016	409006,754	6203512,957	818,173	3,0	5,2
<u>Méthode de positionnement statique pivot PR</u>						
1	01/10/2015	409006,732	6203512,946	818,125	1,4	1,9
2	16/05/2016	409006,735	6203512,948	818,131	1,4	2,4
3	03/06/2016	409006,758	6203512,950	818,149	1,4	2,3

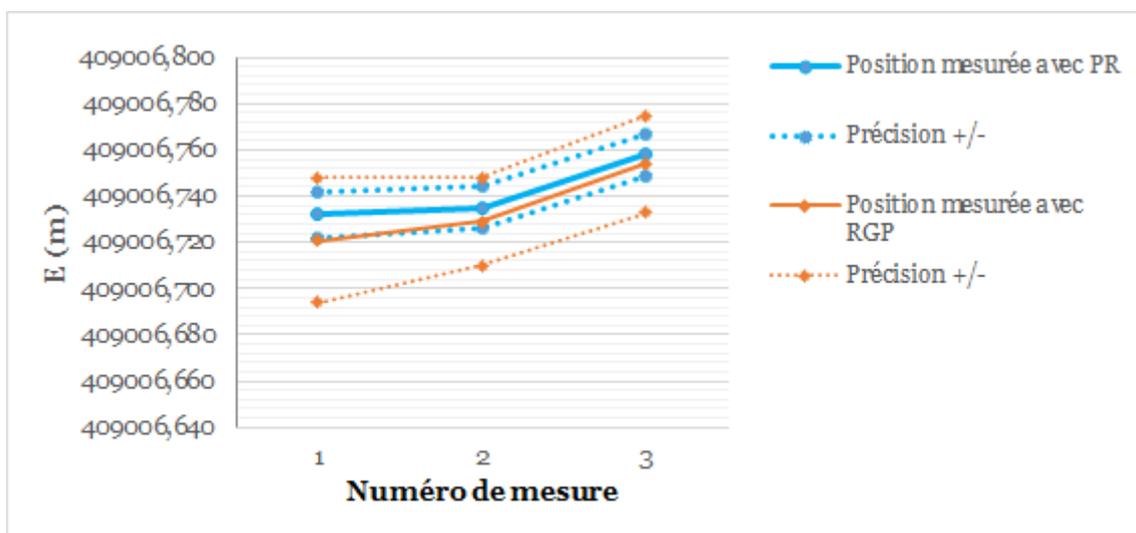


Figure A1.13. Évolution en mètres de la composante est ( $E$ ) du point RB4 du réseau de base reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

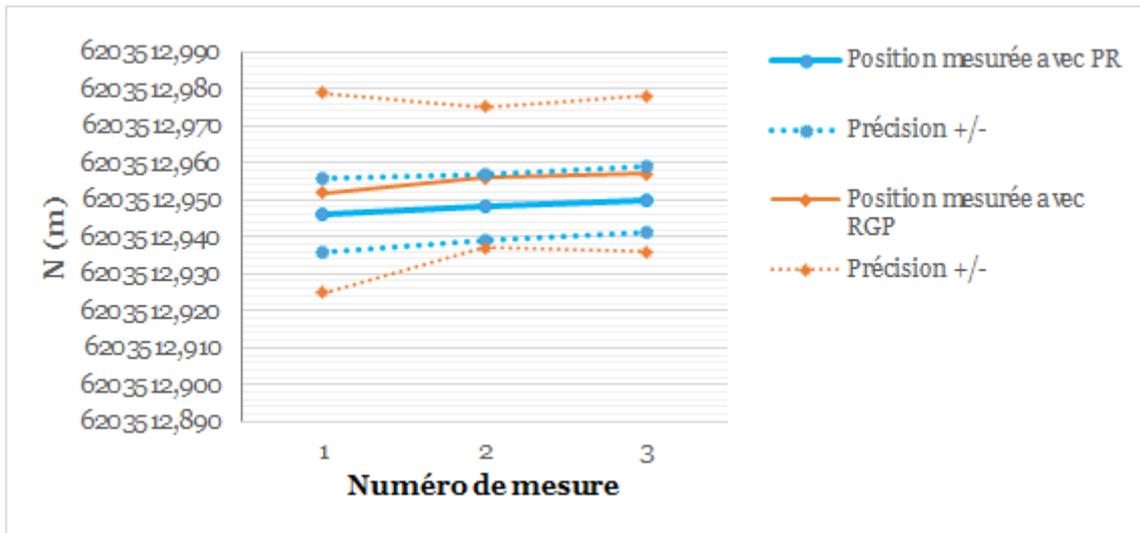


Figure A1.14. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RB4 du réseau de base reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

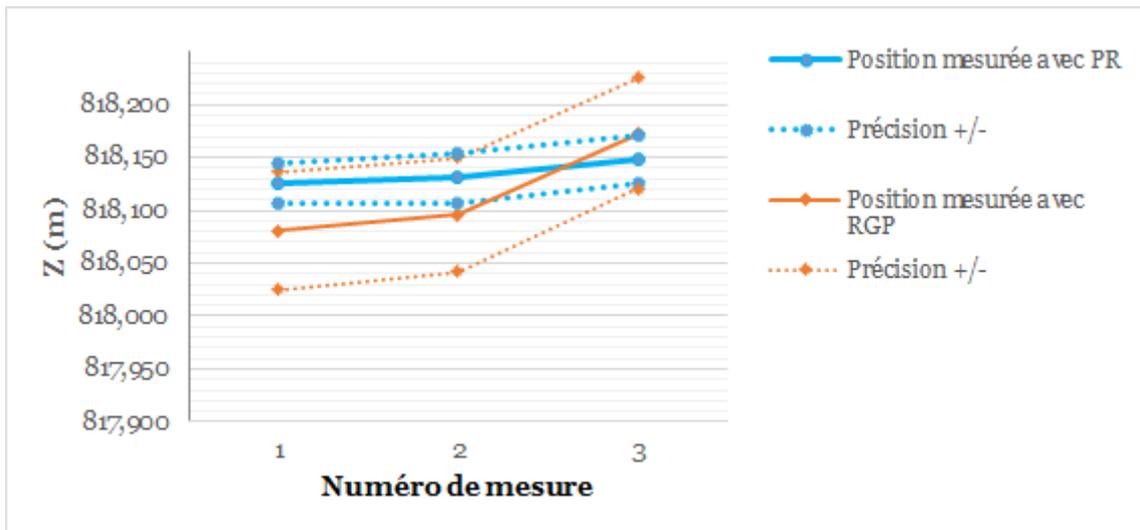


Figure A1.15. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RB4 du réseau de base.

## Point RB5 du réseau de base

Tableau A1.6. Coordonnées du point RB5 du réseau de base avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<i>Méthode de positionnement multistations RGP</i>						
1	01/10/2015	409104,275	6201883,130	1043,211	4,0	5,5
2	16/05/2016	409104,289	6201883,132	1043,226	4,0	5,2
3	03/06/2016	409104,295	6201883,118	1043,218	2,8	5,5
<i>Méthode de positionnement statique pivot PR</i>						
1	01/10/2015	409104,273	6201883,137	1043,228	1,2	1,7
2	16/05/2016	409104,287	6201883,137	1043,241	1,2	2,2
3	03/06/2016	409104,295	6201883,126	1043,237	1,2	2,4

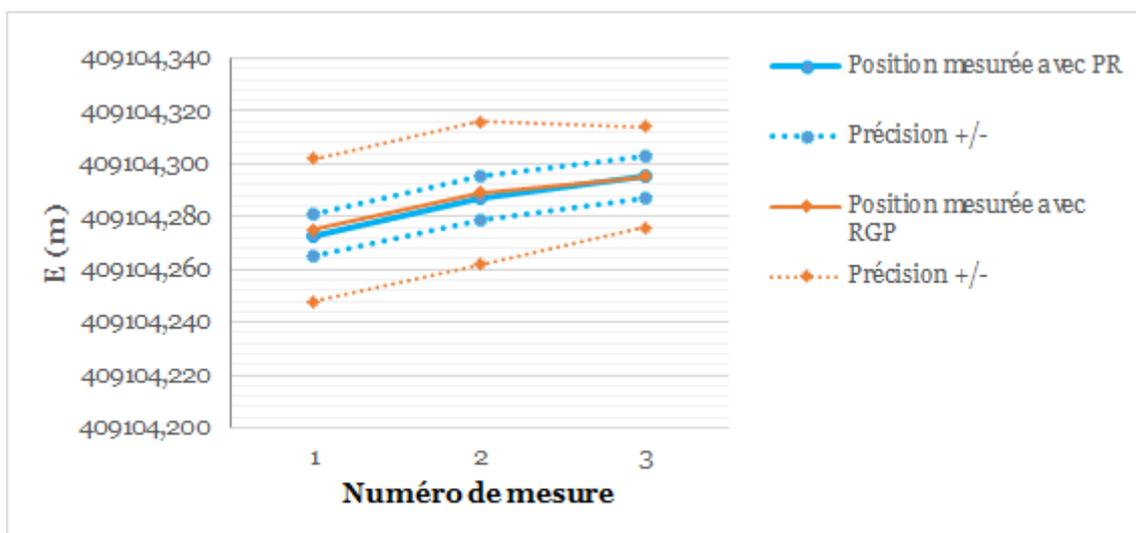


Figure A1.16. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RB5 du réseau de base reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

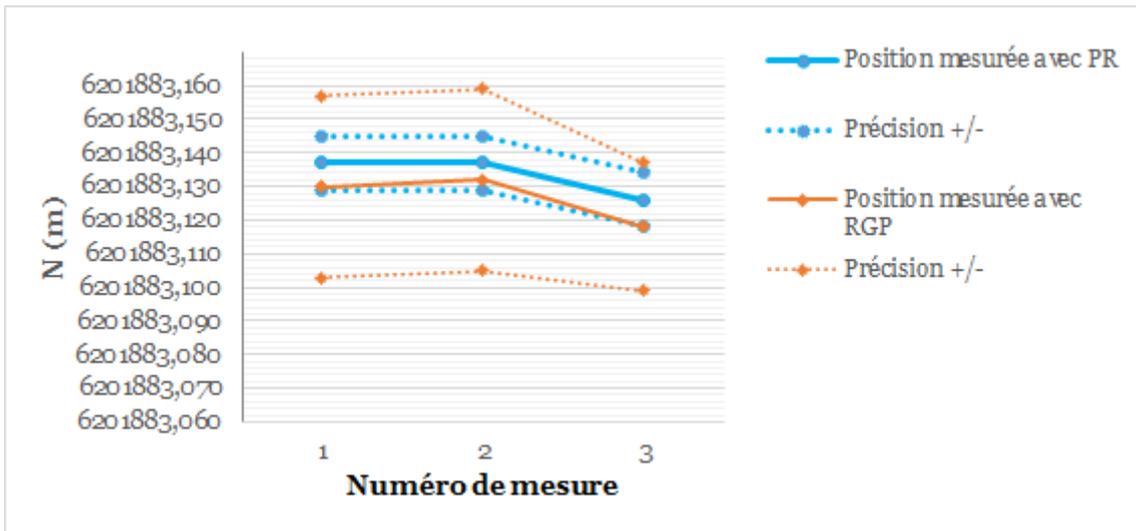


Figure A1.17. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RB5 du réseau de base reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

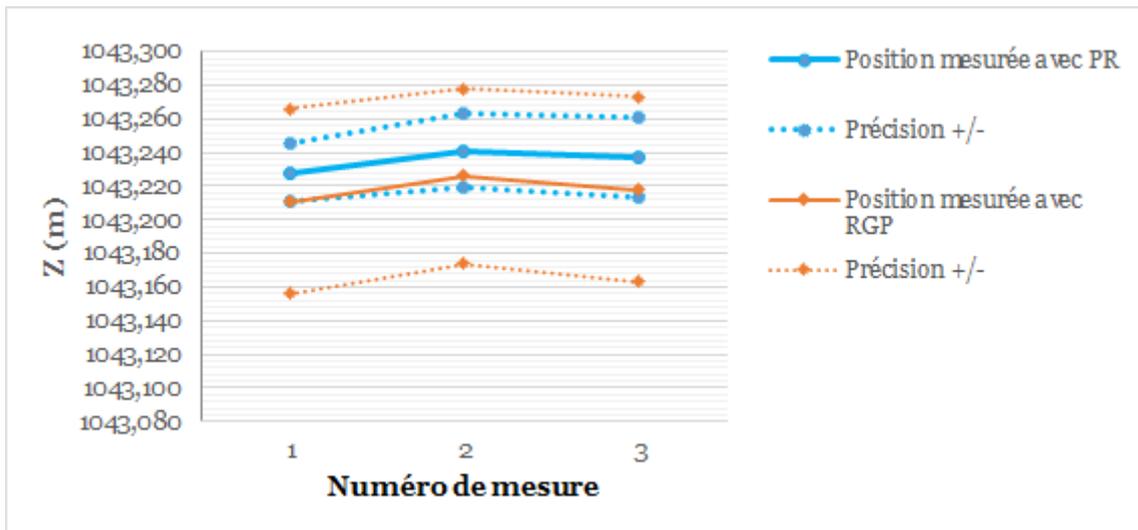


Figure A1.18. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RB5 du réseau de base.

## Point RB6 du réseau de base

Tableau A1.7. Coordonnées du point RB6 du réseau de base avec : (1) la composante est ( $E$ ) et la composante nord ( $N$ ) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 ( $Z$ ) en mètres ; (3) la précision planimétrique ( $dH$ ) et la précision altimétrique ( $dV$ ) en centimètres.

Numéro	Date	$E$ (m)	$N$ (m)	$Z$ (m)	$dH$ (cm)	$dV$ (cm)
<u>Méthode de positionnement multistations RGP</u>						
1	01/10/2015	408644,904	6198758,791	1065,965	3,6	7,0
2	16/05/2016	408644,873	6198758,800	1065,952	4,6	6,3
3	03/06/2016	408644,883	6198758,794	1065,937	4,6	6,3
<u>Méthode de positionnement statique pivot PR</u>						
1	01/10/2015	408644,910	6198758,808	1065,976	1,0	1,7
2	16/05/2016	408644,889	6198758,818	1065,967	1,0	1,4
3	03/06/2016	408644,900	6198758,810	1065,949	1,0	1,5

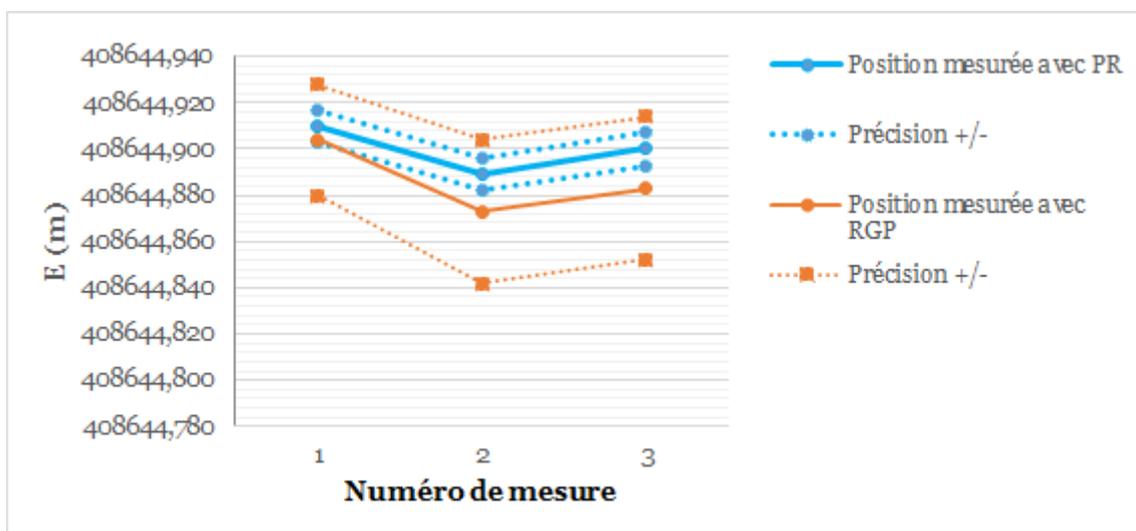


Figure A1.19. Évolution en mètres de la composante est ( $E$ ) du point RB6 du réseau de base reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

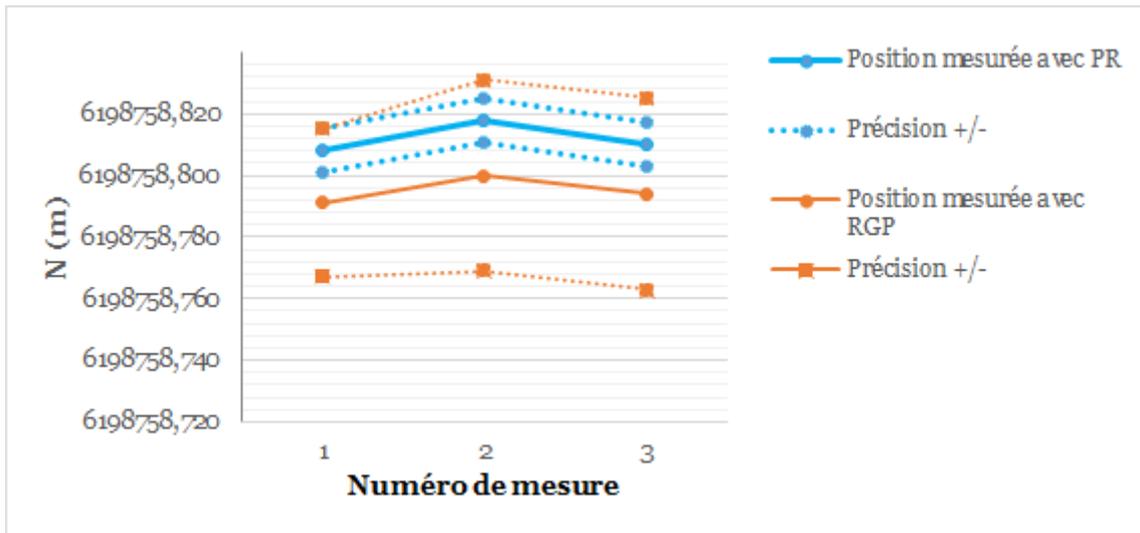


Figure A1.20. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RB6 du réseau de base reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

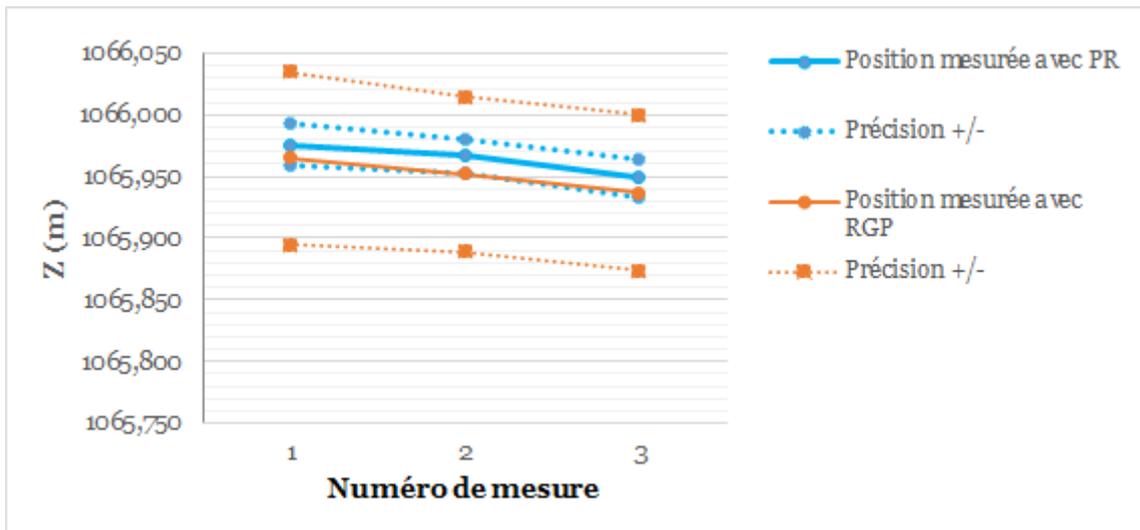


Figure A1.21. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RB6 du réseau de base.

## Point RDA1 du réseau de détail n°1

Tableau A1.8. Coordonnées du point RDA1 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<i>Méthode de positionnement multistations RGP</i>						
1	30/10/2014	407553,617	6201422,410	1794,523	3,6	5,0
2	17/05/2016	407553,606	6201422,422	1794,494	3,2	5,2
3	07/06/2016	407553,606	6201422,429	1794,442	3,1	4,7
<i>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR</i>						
2	17/05/2016	407553,596	6201422,412	1794,481	1,0	1,0
3	07/06/2016	407553,603	6201422,423	1794,458	1,0	1,0

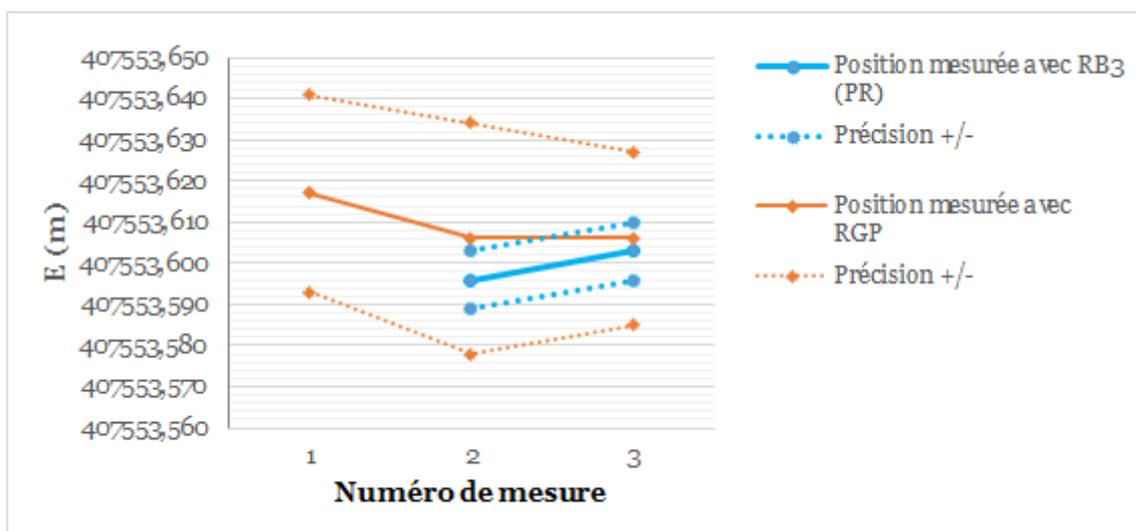


Figure A1.22. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA1 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

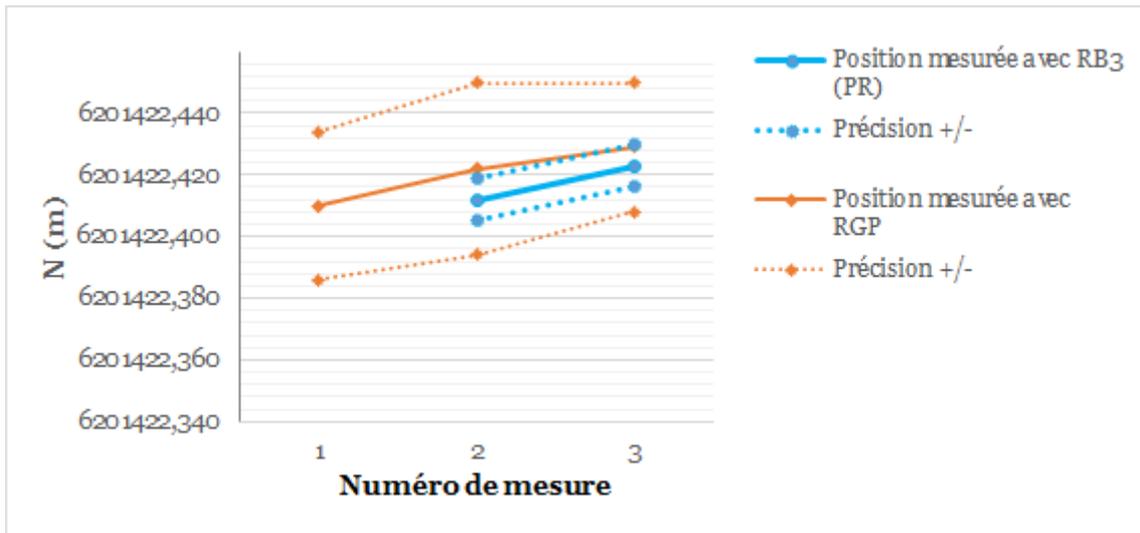


Figure A1.23. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA1 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

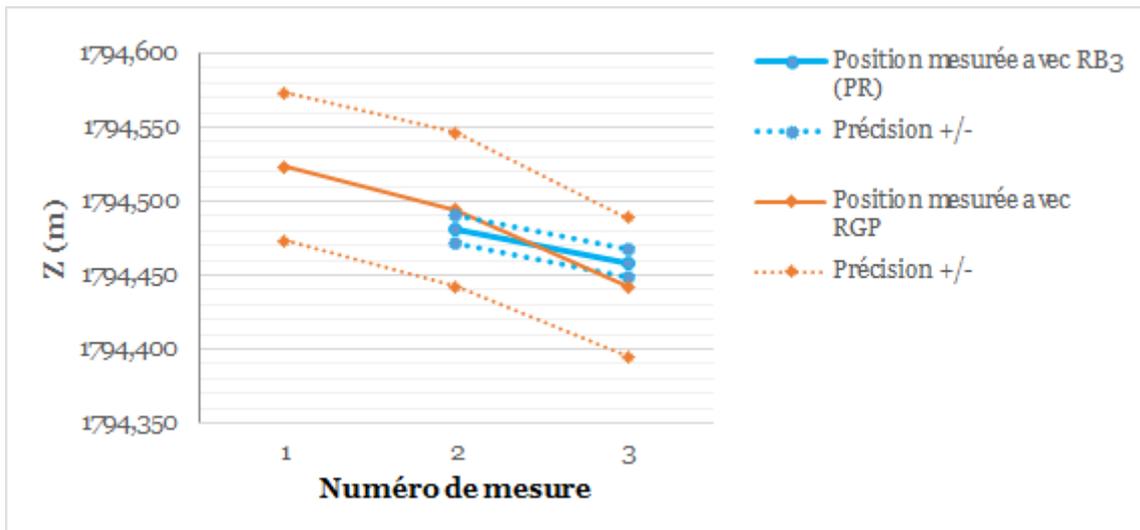


Figure A1.24. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA1 du réseau de détail n°1.

## Point RDA2 du réseau de détail n°1

Tableau A1.9. Coordonnées du point RDA2 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<u>Méthode de positionnement multistations RGP</u>						
1	30/10/2014	407470,087	6201463,708	1774,949	3,6	5,1
2	17/05/2016	407470,089	6201463,686	1774,946	3,1	5,7
3	07/06/2016	407470,087	6201463,707	1774,928	3,4	5,3
<u>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR</u>						
2	17/05/2016	407470,083	6201463,693	1774,930	1,0	1,0
3	07/06/2016	407470,078	6201463,709	1774,925	1,0	1,0

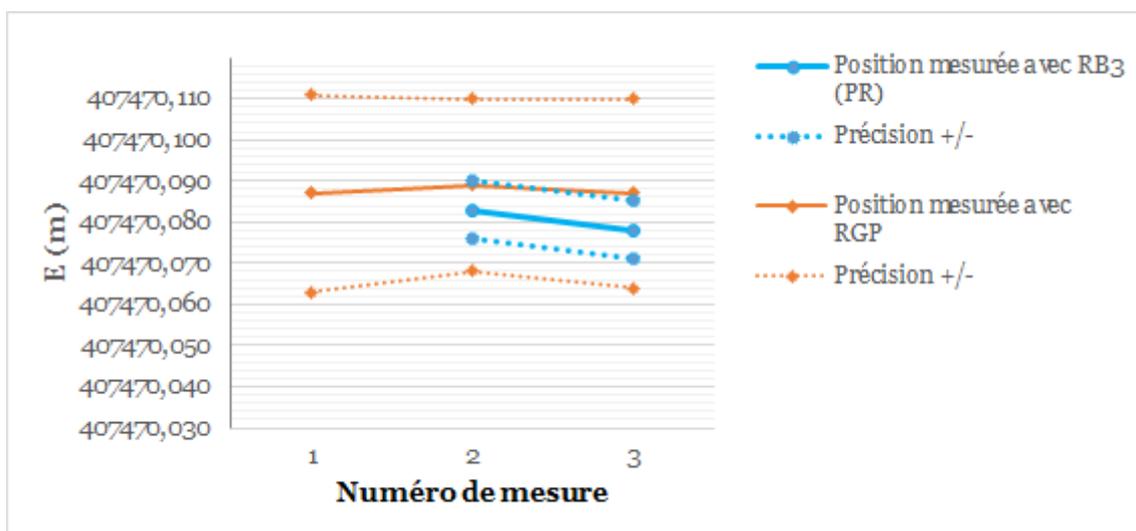


Figure A1.25. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA2 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

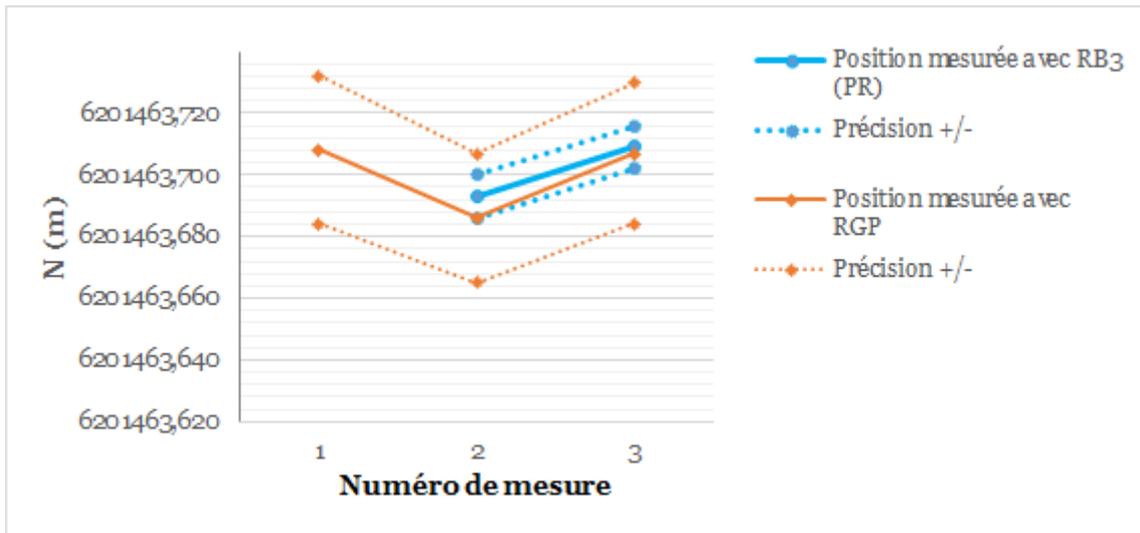


Figure A1.26. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA2 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

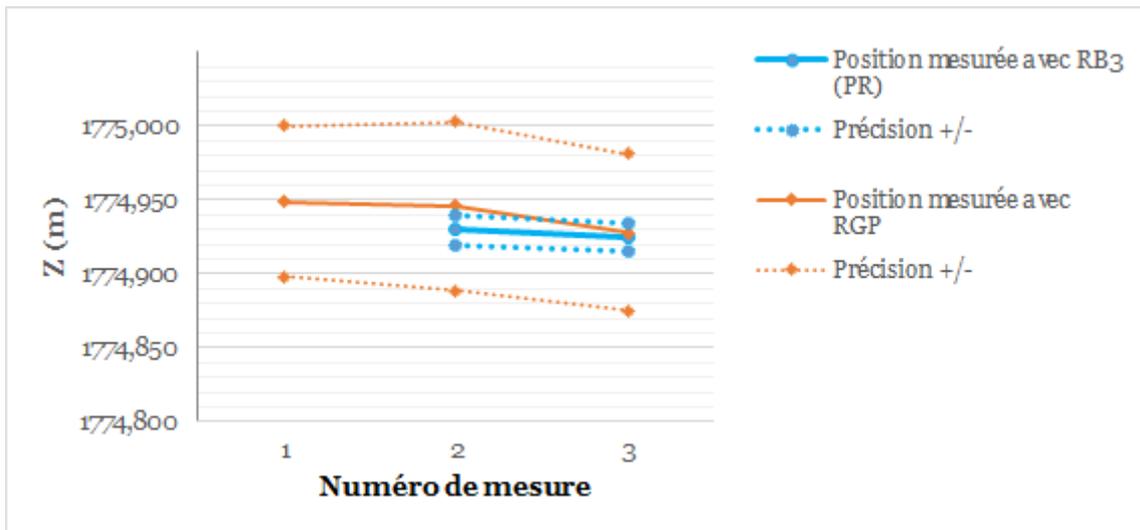


Figure A1.27. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA2 du réseau de détail n°1.

## Point RDA3 du réseau de détail n°1

Tableau A1.10. Coordonnées du point RDA3 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<u>Méthode de positionnement multistations RGP</u>						
1	30/10/2014	407481,018	6201519,619	1784,820	3,6	5,2
2	17/05/2016	407481,016	6201519,616	1784,808	3,2	5,5
3	07/06/2016	407481,031	6201519,596	1784,747	3,3	5,4
<u>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR</u>						
2	17/05/2016	407481,012	6201519,613	1784,784	1,0	1,0
3	07/06/2016	407481,023	6201519,601	1784,779	1,0	1,0

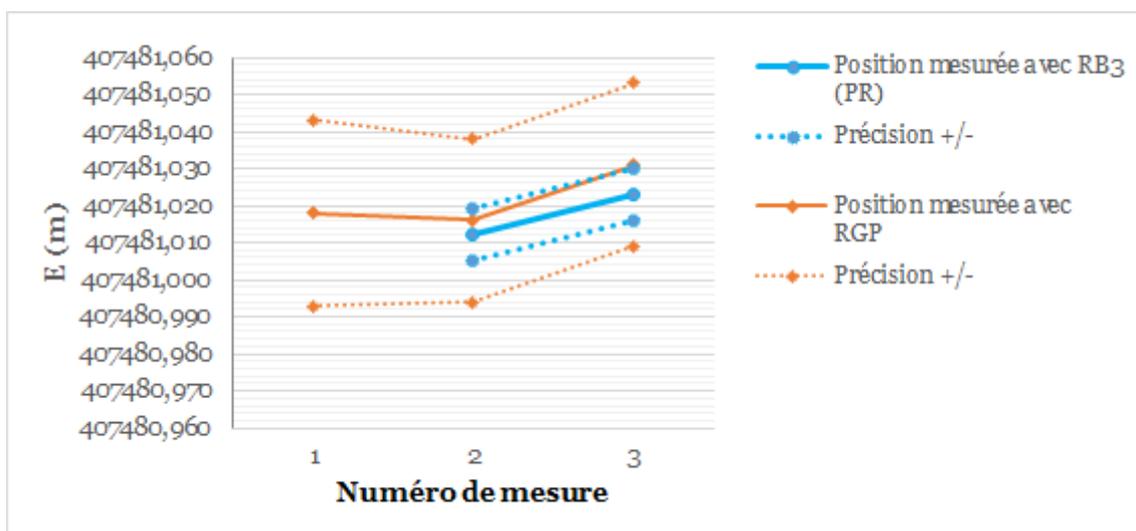


Figure A1.28. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA3 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

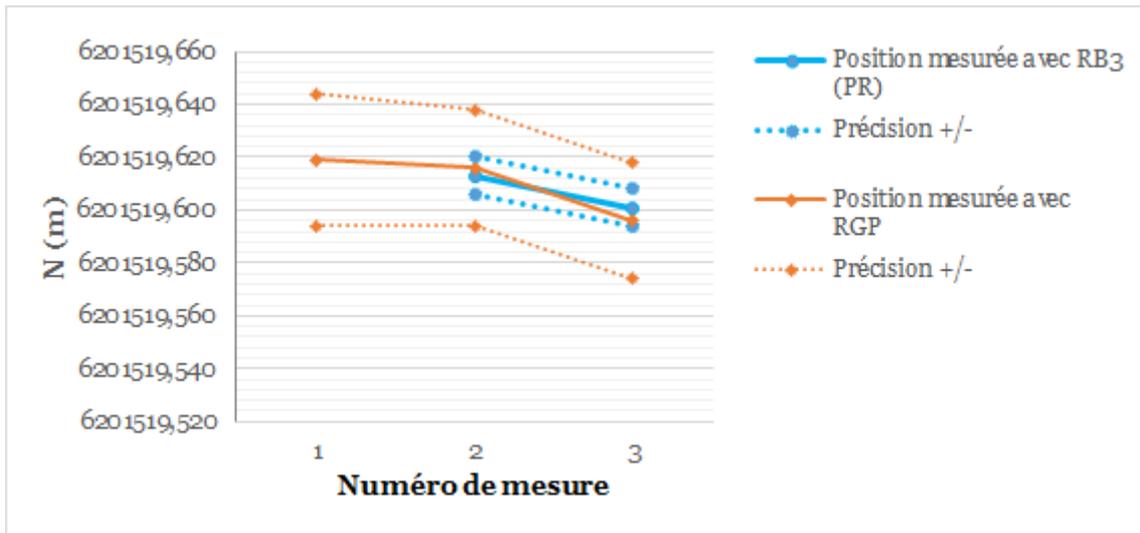


Figure A1.29. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA3 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

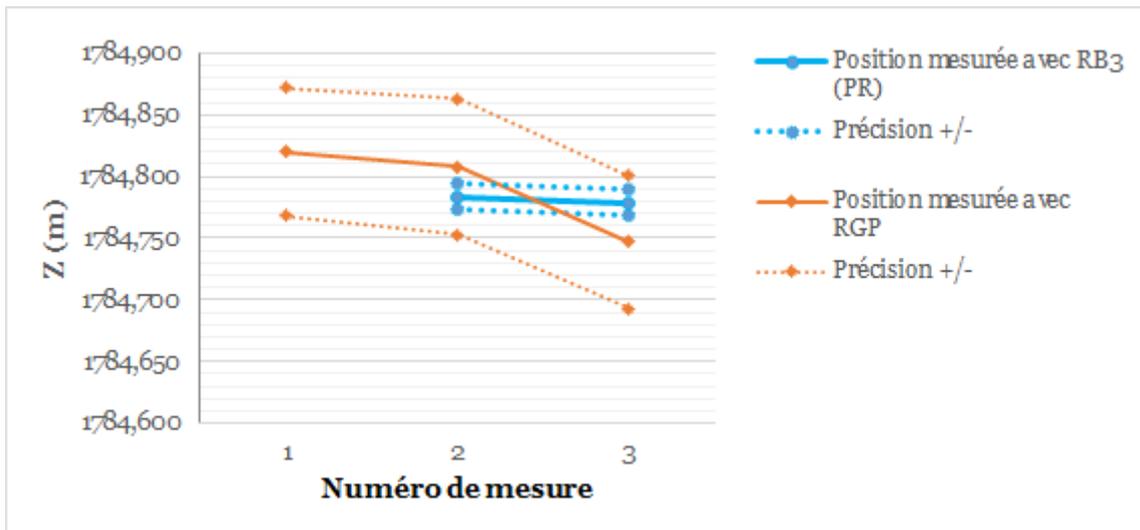


Figure A1.30. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA3 du réseau de détail n°1.

## Point RDA4 du réseau de détail n°1

Tableau A1.11. Coordonnées du point RDA4 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<i>Méthode de positionnement multistations RGP</i>						
1	30/10/2014	407404,917	6201667,492	1808,199	3,6	5,3
2	17/05/2016	407404,913	6201667,493	1808,181	3,0	5,2
3	07/06/2016	407404,921	6201667,483	1808,113	3,4	5,2
<i>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR</i>						
2	17/05/2016	407404,909	6201667,496	1808,169	1,0	1,0
3	07/06/2016	407404,924	6201667,476	1808,149	1,0	1,0

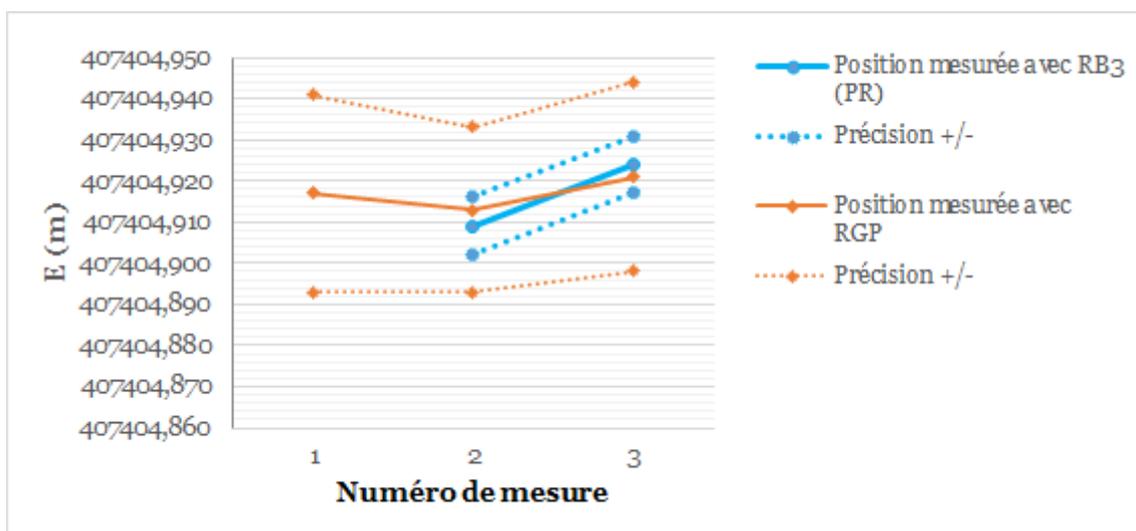


Figure A1.31. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA4 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

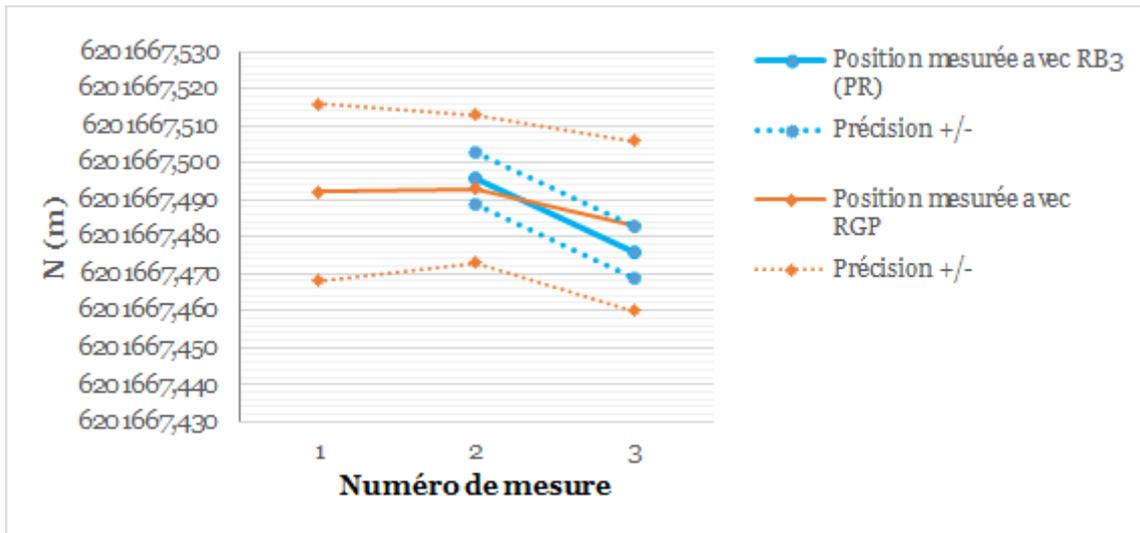


Figure A1.32. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA4 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

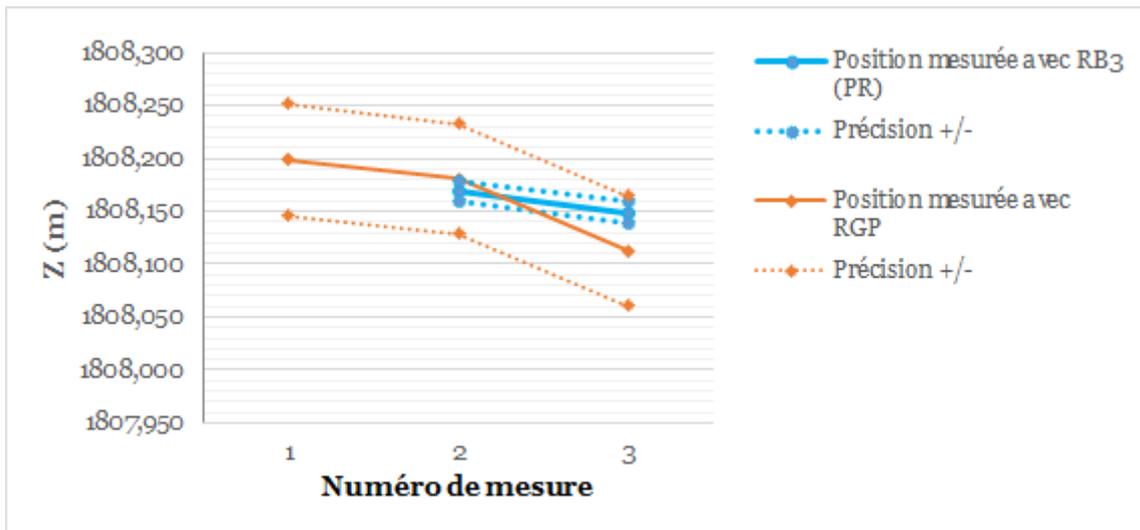


Figure A1.33. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA4 du réseau de détail n°1.

## Point RDA5 du réseau de détail n°1

Tableau A1.12. Coordonnées du point RDA5 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<u>Méthode de positionnement multistations RGP</u>						
1	30/10/2014	407385,485	6201765,863	1834,270	3,6	5,4
2	17/05/2016	407385,476	6201765,851	1834,253	3,2	5,4
3	07/06/2016	407385,485	6201765,840	1834,140	3,6	6,0
<u>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR</u>						
2	17/05/2016	407385,483	6201765,857	1834,218	1,0	1,0
3	07/06/2016	407385,487	6201765,841	1834,194	1,0	1,0

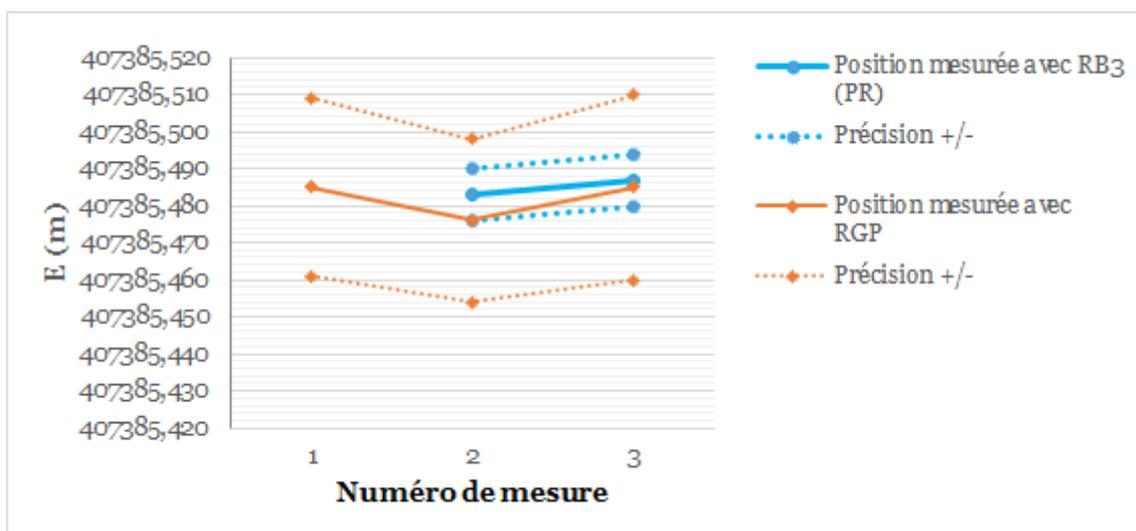


Figure A1.34. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA5 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

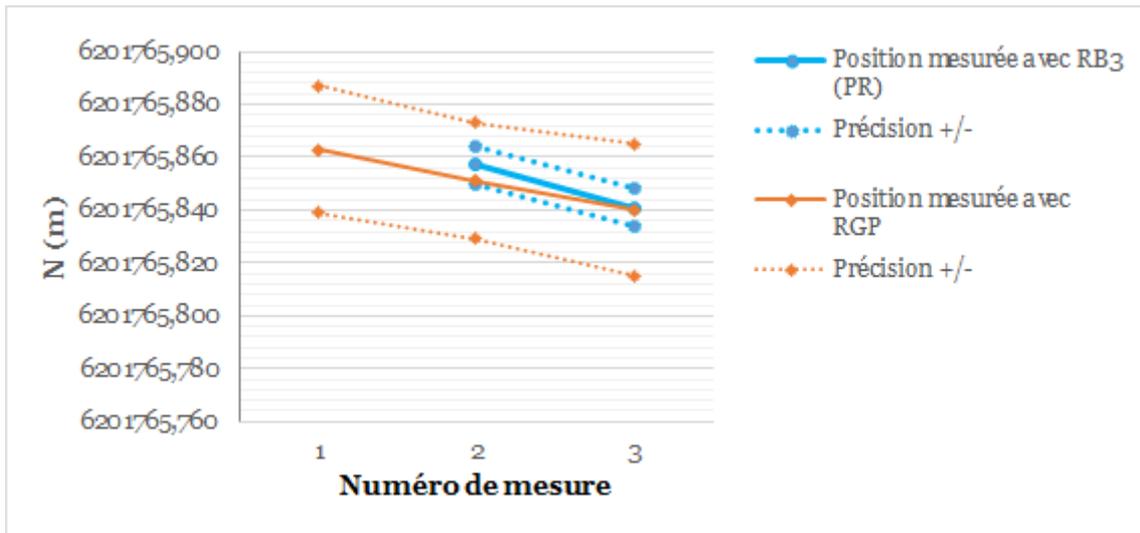


Figure A1.35. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA5 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

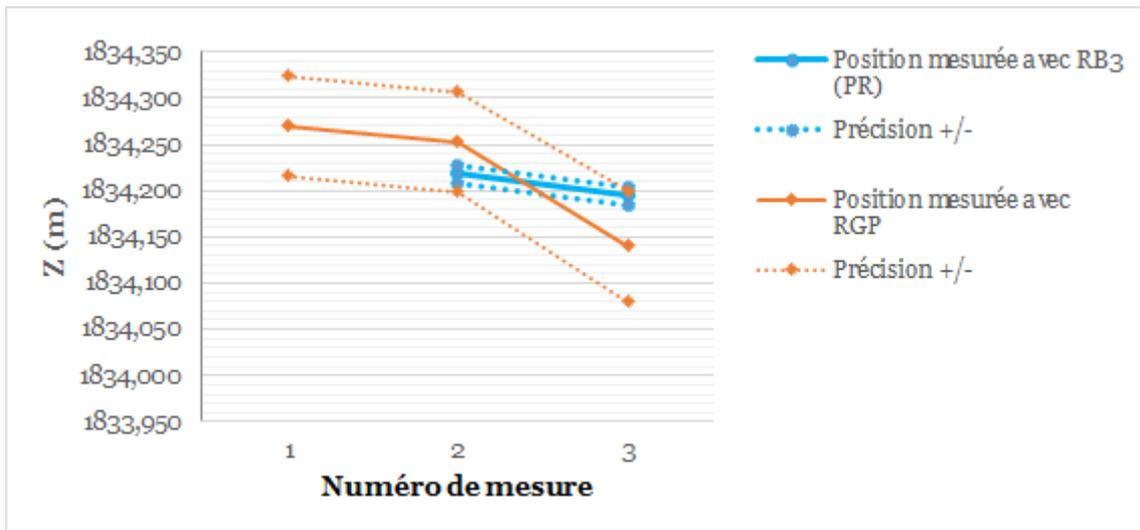


Figure A1.36. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA5 du réseau de détail n°1.

## Point RDA6 du réseau de détail n°1

Tableau A1.13. Coordonnées du point RDA6 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<u>Méthode de positionnement multistations RGP</u>						
1	30/10/2014	407487,382	6201751,874	1877,593	3,4	5,2
2	17/05/2016	407487,407	6201751,858	1877,548	3,1	4,9
3	07/06/2016	407487,408	6201751,848	1877,448	3,4	5,2
<u>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR</u>						
2	17/05/2016	407487,409	6201751,867	1877,513	1,0	1,0
3	07/06/2016	407487,417	6201751,855	1877,486	1,0	1,0

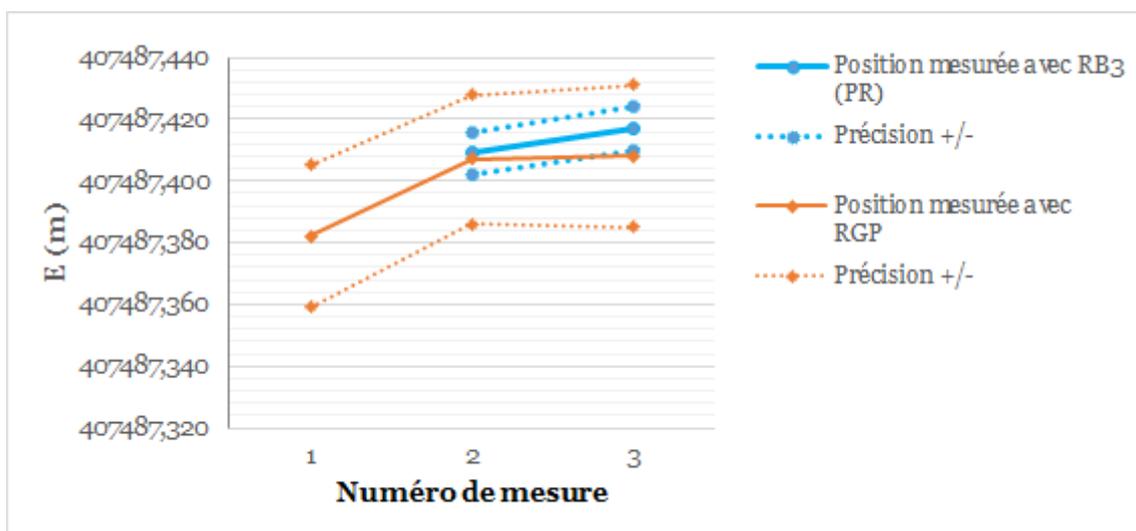


Figure A1.37. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA6 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

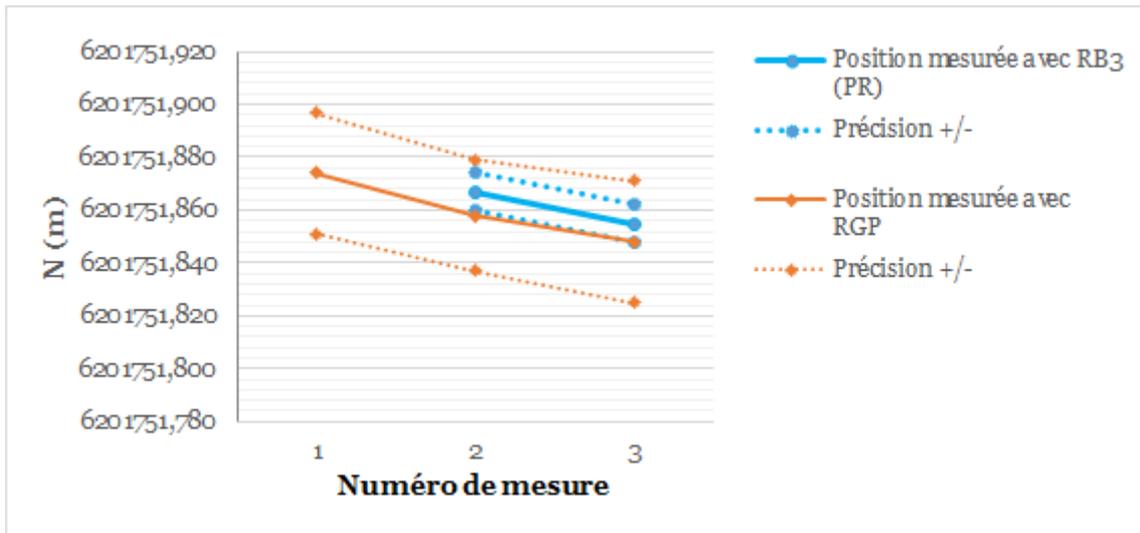


Figure A1.38. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA6 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

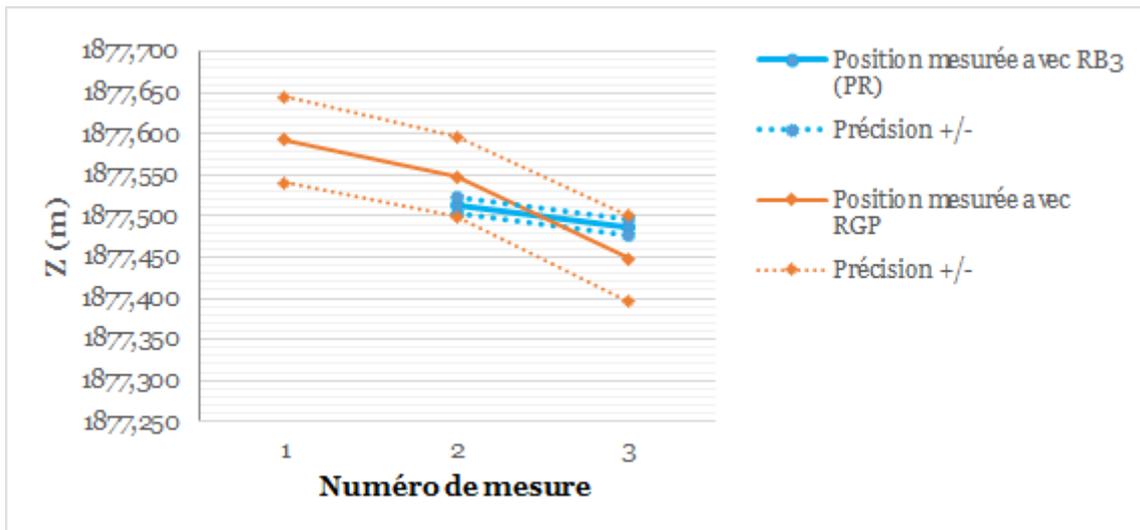


Figure A1.39. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA6 du réseau de détail n°1.

## Point RDA7 du réseau de détail n°1

Tableau A1.14. Coordonnées du point RDA7 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<u>Méthode de positionnement multistations RGP</u>						
1	30/10/2014	407441,675	6201827,455	1882,465	3,3	5,2
2	17/05/2016	407441,701	6201827,463	1882,414	3,4	4,8
3	07/06/2016	407441,691	6201827,466	1882,376	3,3	5,1
<u>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR</u>						
2	17/05/2016	407441,690	6201827,460	1882,416	1,0	1,0
3	07/06/2016	407441,681	6201827,464	1882,409	1,0	1,0

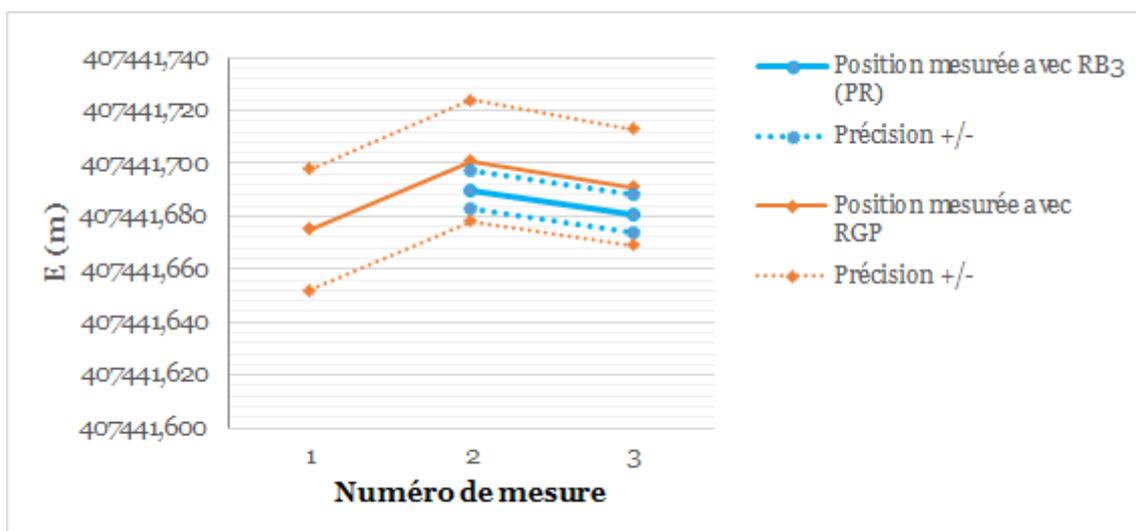


Figure A1.40. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA7 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

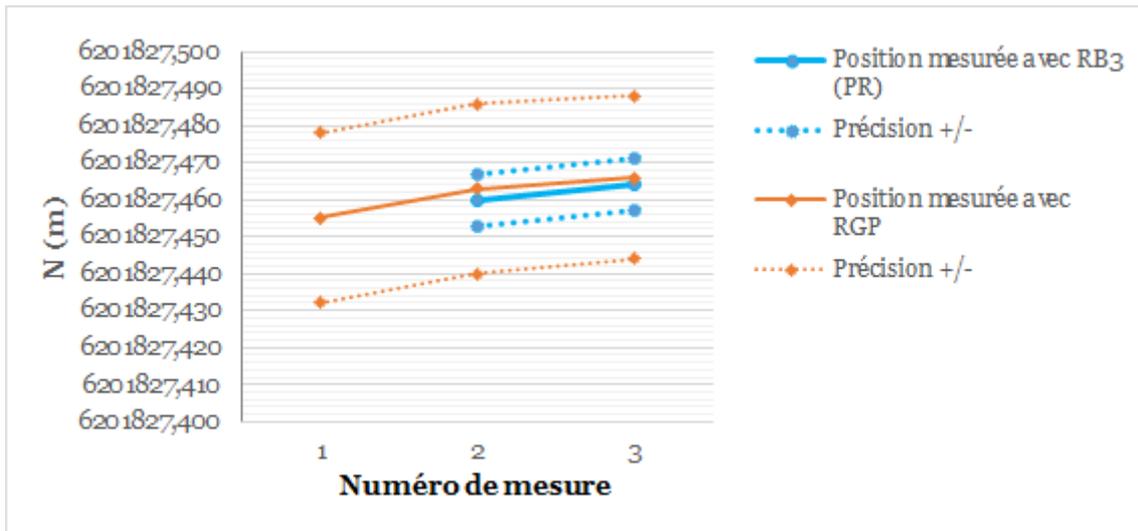


Figure A1.41. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA7 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

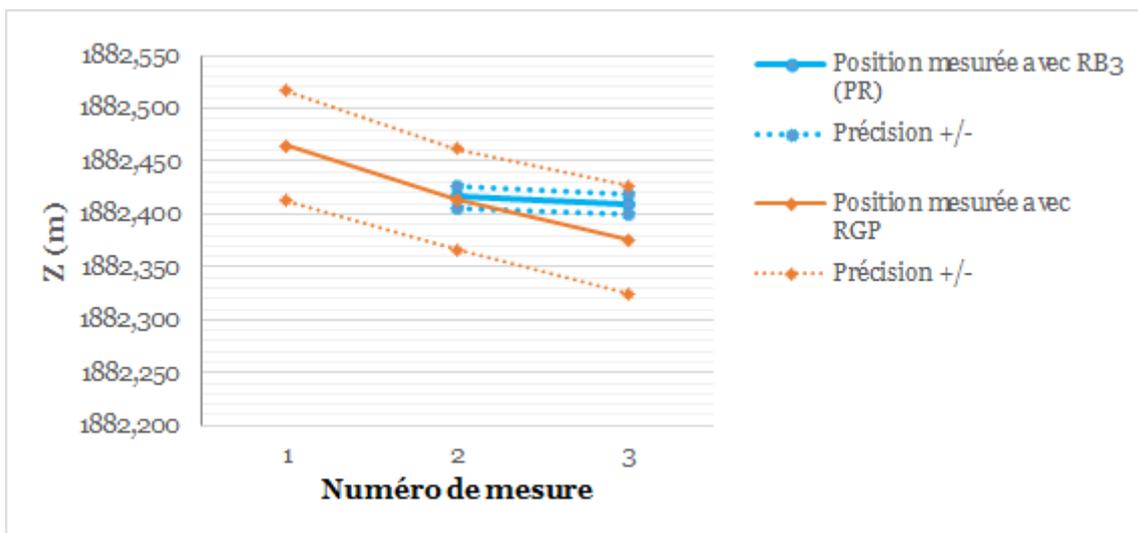


Figure A1.42. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA7 du réseau de détail n°1.

## Point RDA8 du réseau de détail n°1

Tableau A1.15. Coordonnées du point RDA8 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<u>Méthode de positionnement multistations RGP</u>						
1	30/10/2014	407434,066	6201872,513	1876,081	3,8	6,5
2	17/05/2016	407434,086	6201872,509	1876,028	3,5	4,8
3	07/06/2016	407434,087	6201872,503	1876,016	3,4	5,3
<u>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR</u>						
2	17/05/2016	407434,081	6201872,516	1876,037	1,0	1,0
3	07/06/2016	407434,084	6201872,504	1876,032	1,0	1,0

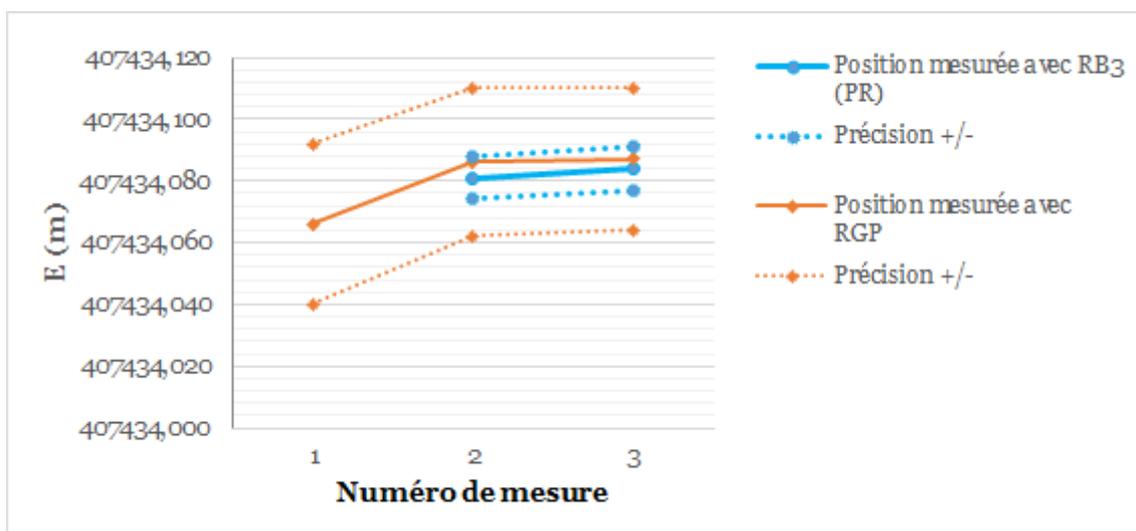


Figure A1.43. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA8 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

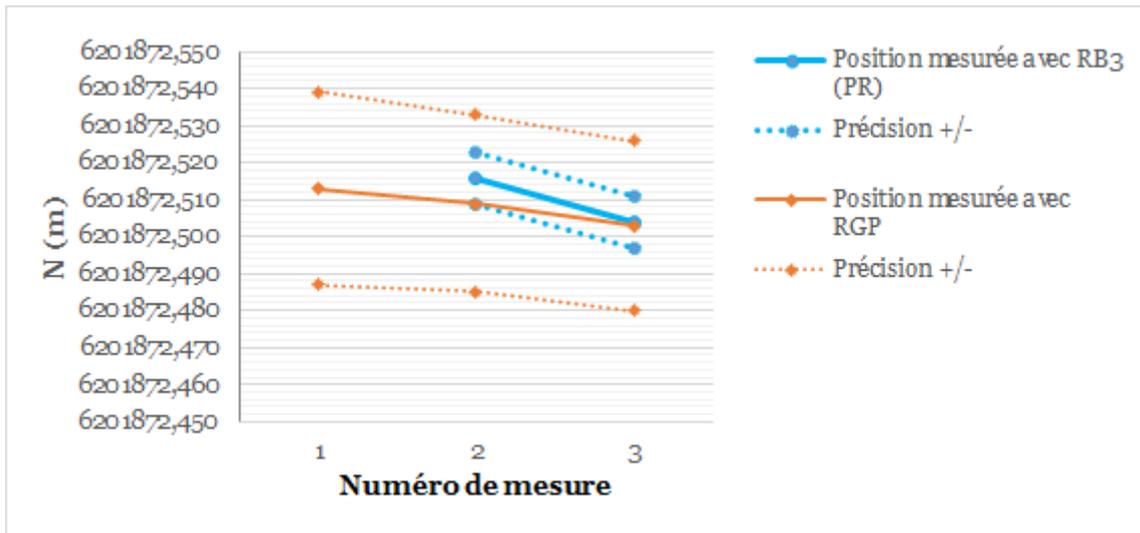


Figure A1.44. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA8 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

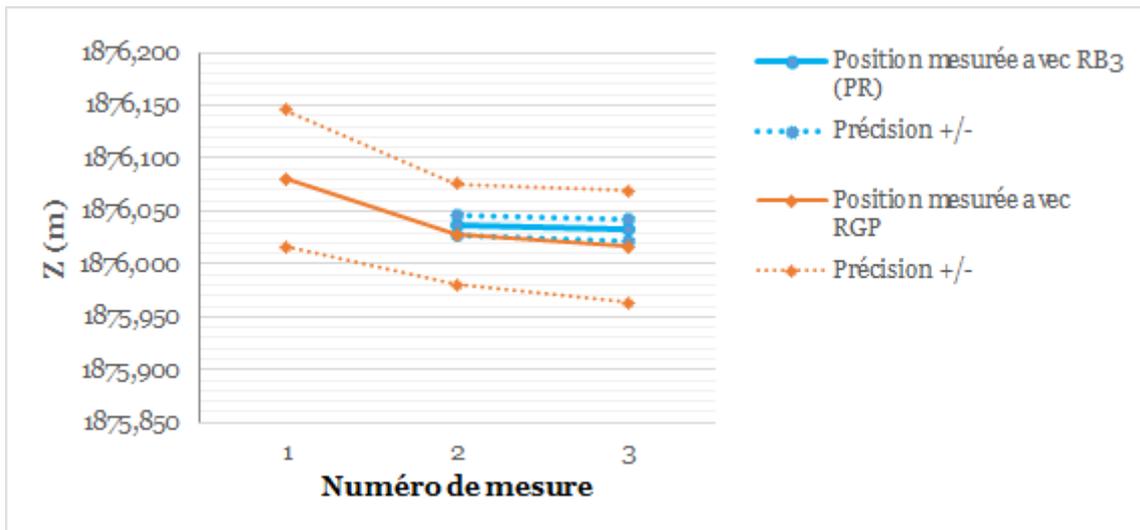


Figure A1.45. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA8 du réseau de détail n°1.

## Point RDA9 du réseau de détail n°1

Tableau A1.16. Coordonnées du point RDA9 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<i>Méthode de positionnement multistations RGP</i>						
1	30/10/2014	407532,211	6201761,644	1843,293	3,1	5,6
2	07/06/2016	407532,220	6201761,635	1843,166	2,7	5,9
<i>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR</i>						
2	07/06/2016	407532,209	6201761,639	1843,199	1,0	1,0

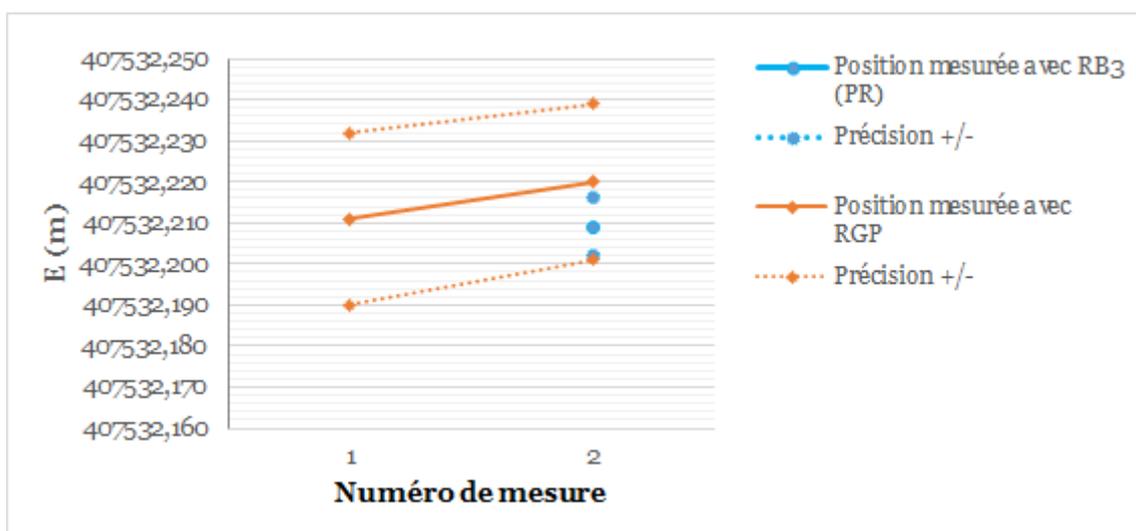


Figure A1.46. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA9 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

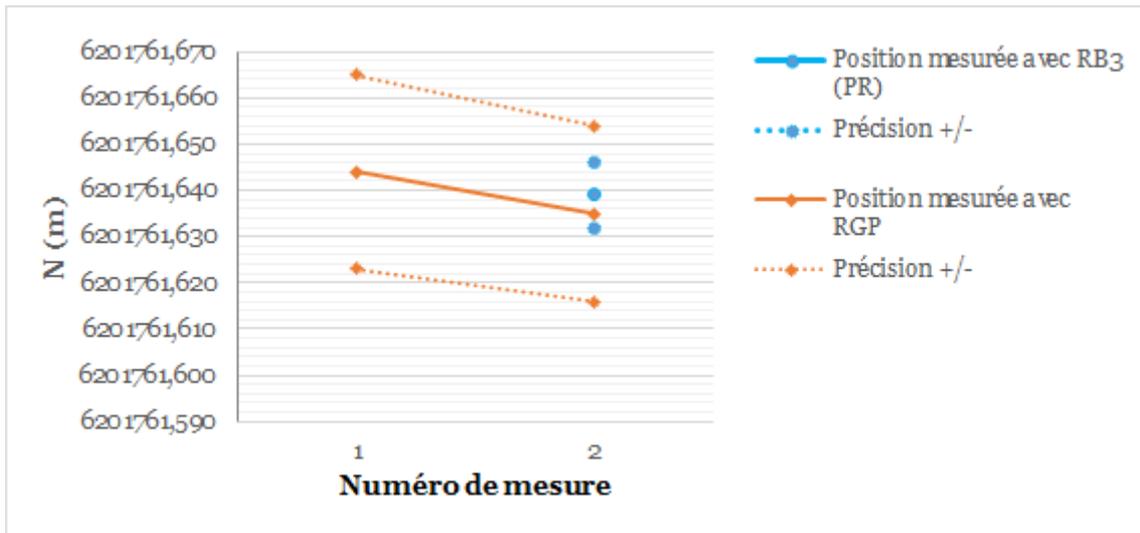


Figure A1.47. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA9 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

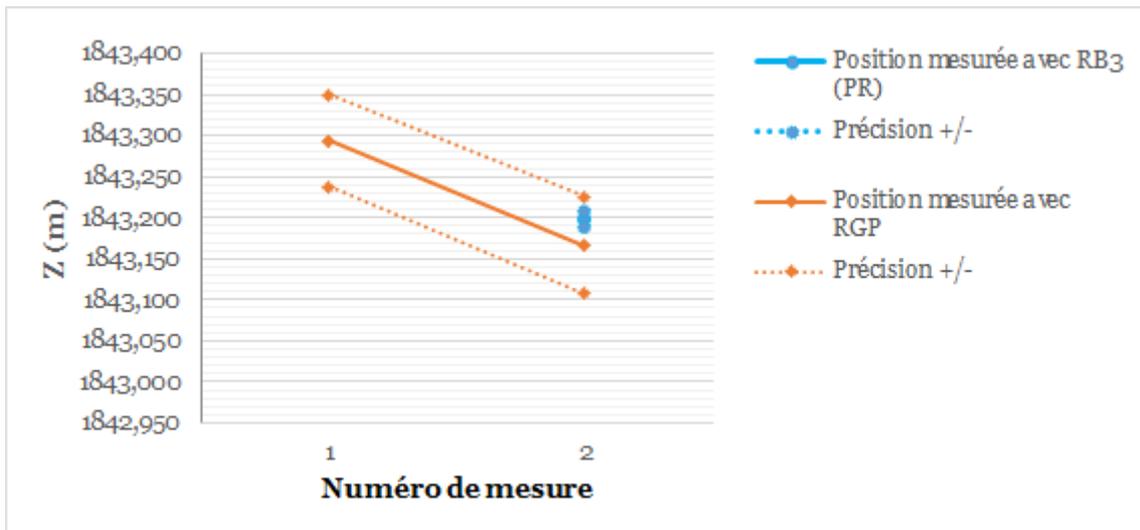


Figure A1.48. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA9 du réseau de détail n°1.

## Point RDA10 du réseau de détail n°1

Tableau A1.17. Coordonnées du point RDA10 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<u>Méthode de positionnement multistations RGP</u>						
1	30/10/2014	407631,406	6201758,716	1822,268	3,0	5,7
2	17/05/2016	407631,418	6201758,699	1822,213	3,8	5,2
3	07/06/2016	407631,413	6201758,715	1822,189	3,0	5,2
<u>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR</u>						
2	17/05/2016	407631,401	6201758,709	1822,216	1,0	1,0
3	07/06/2016	407631,398	6201758,717	1822,206	1,0	1,0

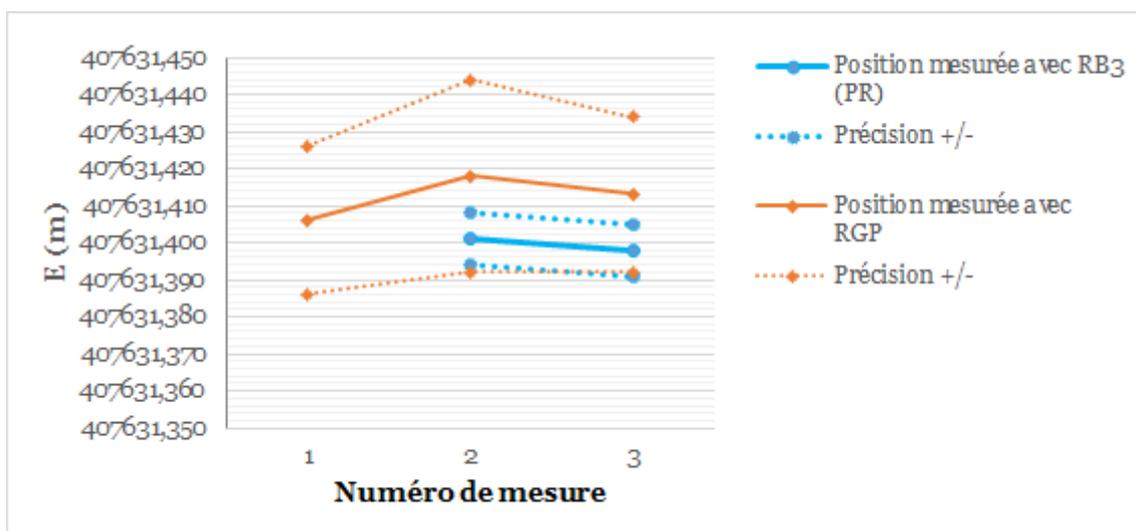


Figure A1.49. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA10 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

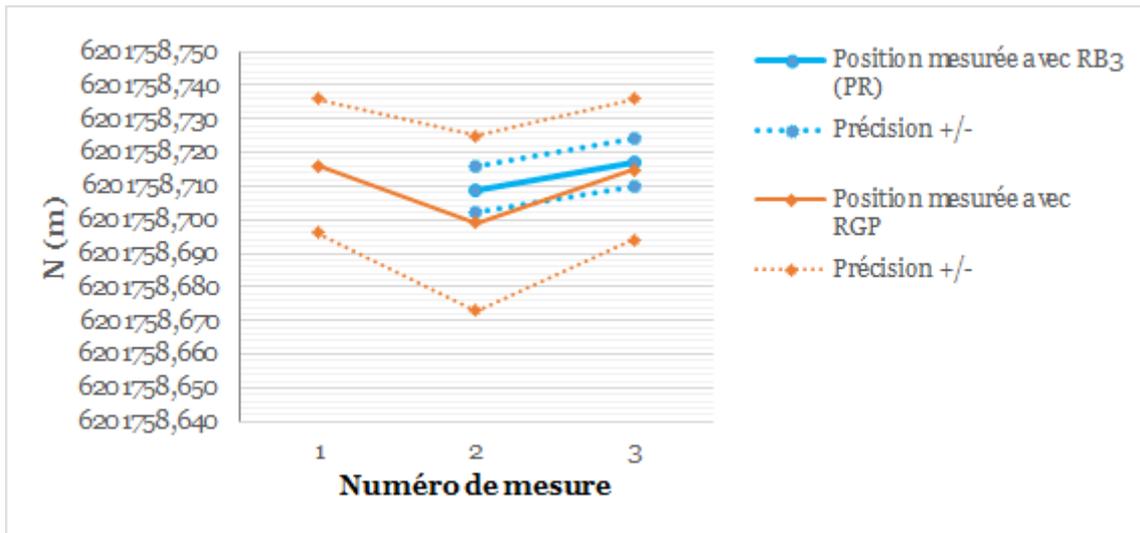


Figure A1.50. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA10 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

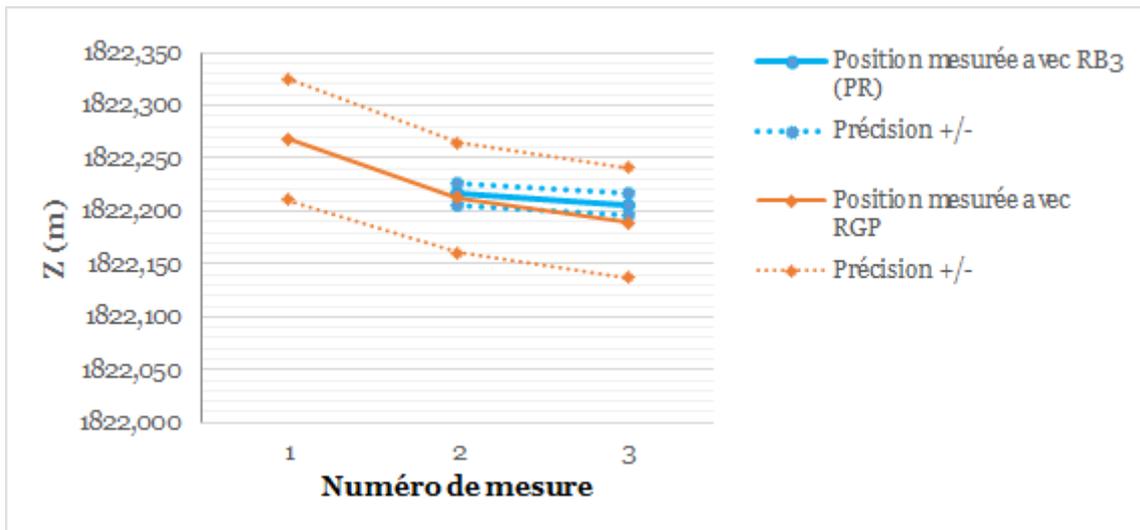


Figure A1.51. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA10 du réseau de détail n°1.

## Point RDA11 du réseau de détail n°1

Tableau A1.18. Coordonnées du point RDA11 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<u>Méthode de positionnement multistations RGP</u>						
1	30/10/2014	407614,593	6201722,860	1828,877	2,9	5,5
2	17/05/2016	407614,609	6201722,860	1828,817	3,8	4,9
3	07/06/2016	407614,605	6201722,866	1828,819	3,0	5,3
<u>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR</u>						
2	17/05/2016	407614,611	6201722,869	1828,843	1,0	1,0
3	07/06/2016	407614,596	6201722,878	1828,848	1,0	1,0

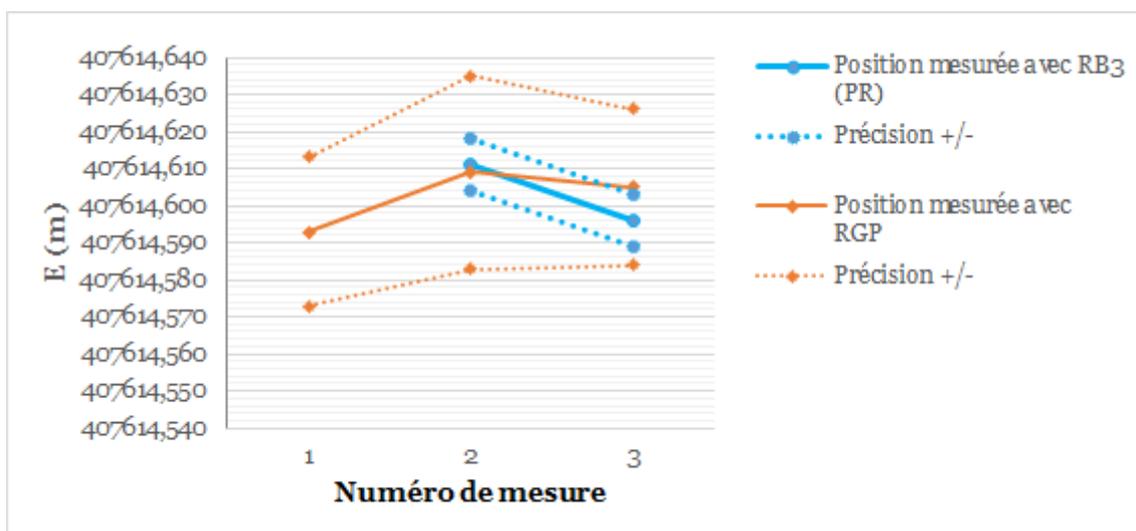


Figure A1.52. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA11 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

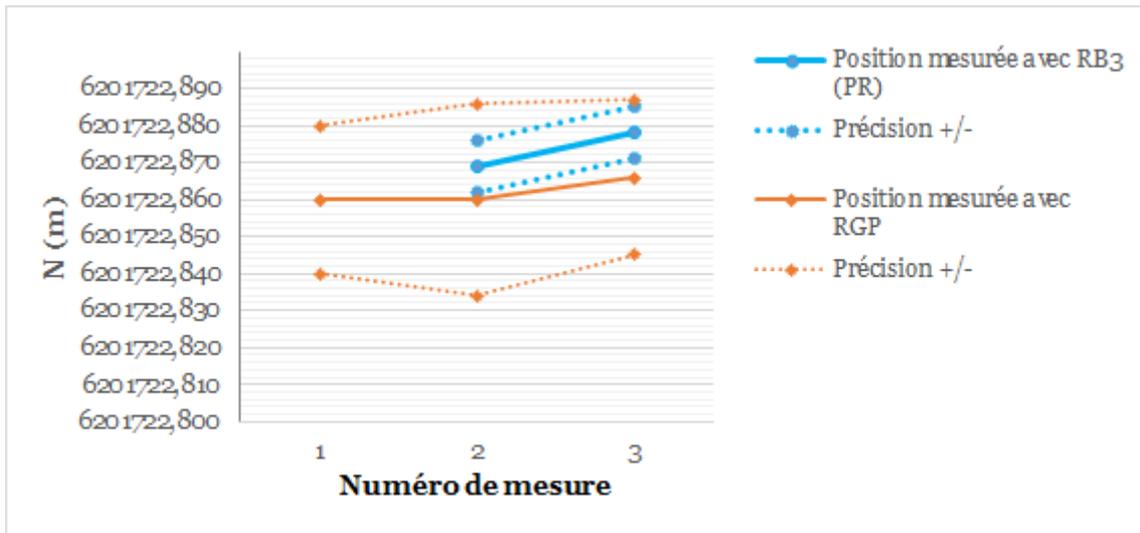


Figure A1.53. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA11 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

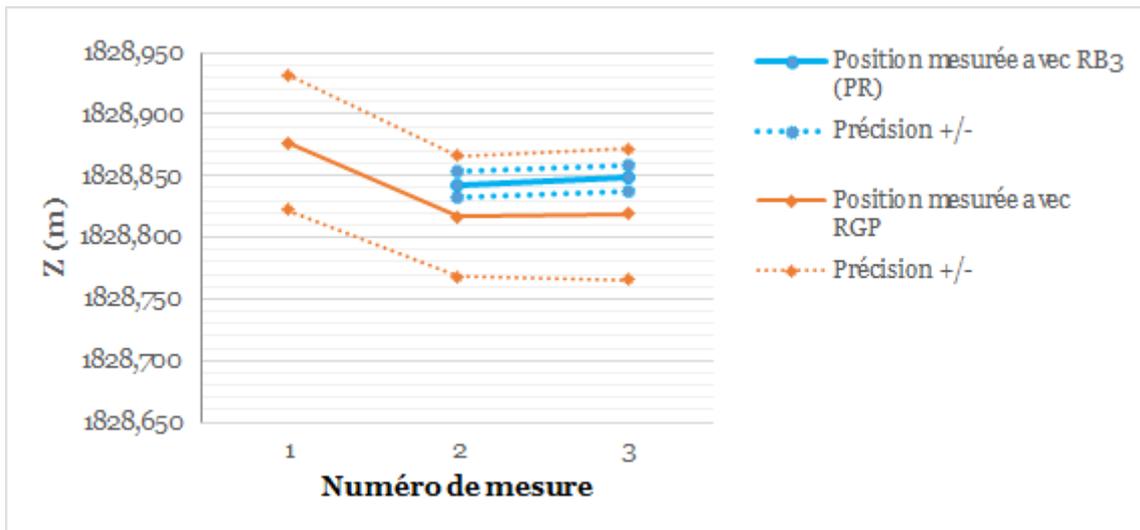


Figure A1.54. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA11 du réseau de détail n°1.

## Point RDA12 du réseau de détail n°1

Tableau A1.19. Coordonnées du point RDA12 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<u>Méthode de positionnement multistations RGP</u>						
1	30/10/2014	407682,008	6201674,333	1816,120	2,8	5,4
2	17/05/2016	407682,006	6201674,323	1816,084	4,6	5,5
3	07/06/2016	407682,003	6201674,335	1816,080	3,1	5,2
<u>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR</u>						
2	17/05/2016	407682,001	6201674,327	1816,100	1,0	1,0
3	07/06/2016	407681,995	6201674,331	1816,093	1,0	1,0

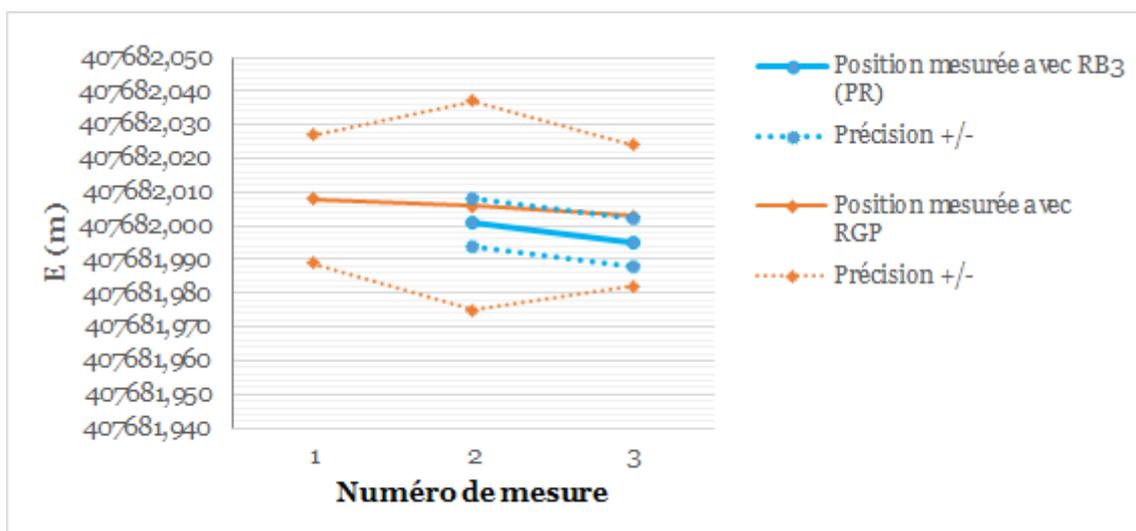


Figure A1.55. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA12 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

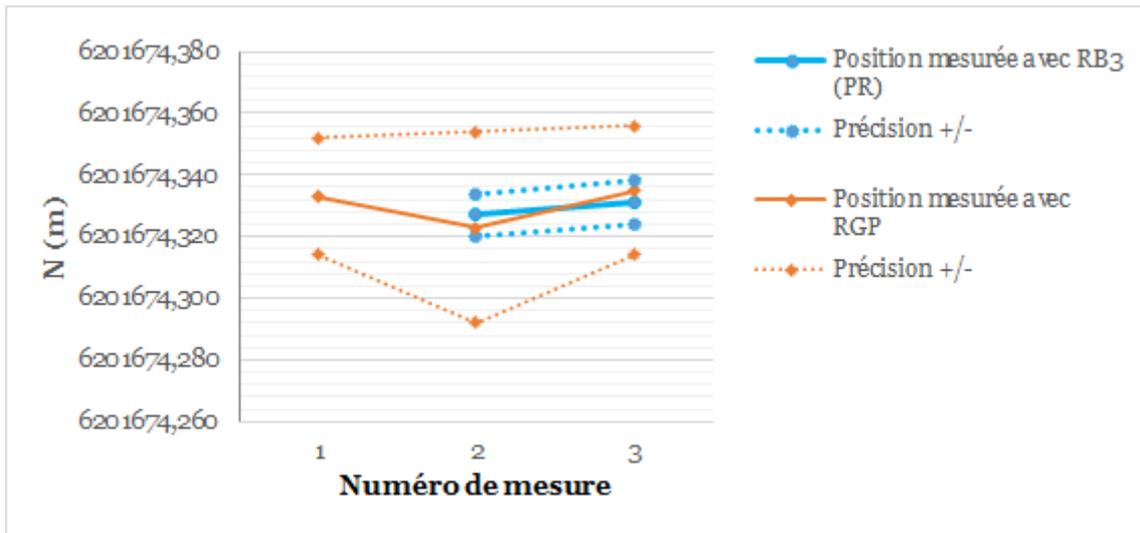


Figure A1.56. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA12 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

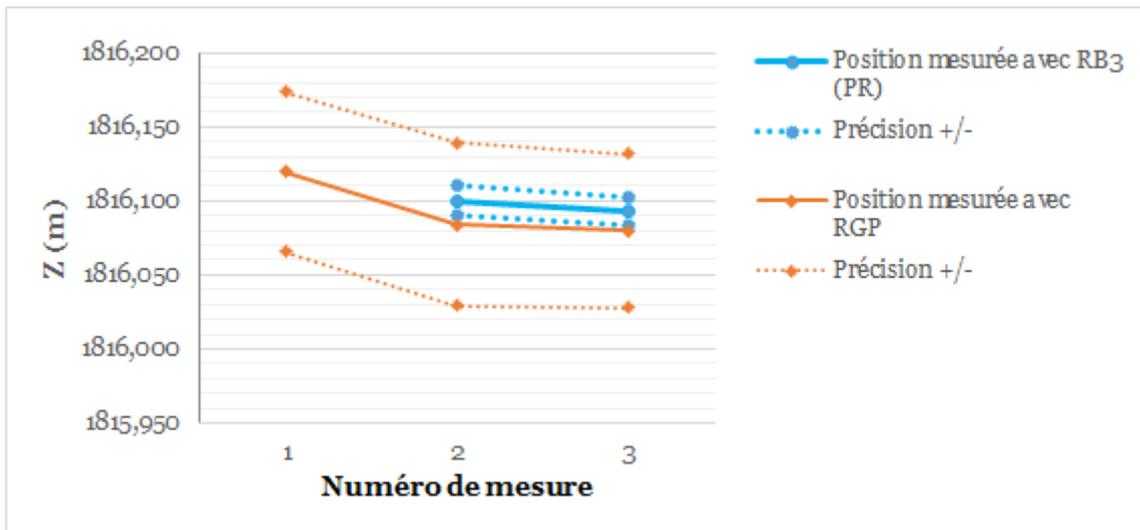


Figure A1.57. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA12 du réseau de détail n°1.

## Point RDA13 du réseau de détail n°1

Tableau A1.20. Coordonnées du point RDA13 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<u>Méthode de positionnement multistations RGP</u>						
1	30/10/2014	407651,914	6201636,937	1829,080	2,8	5,5
2	17/05/2016	407651,935	6201636,907	1829,033	4,3	4,6
3	07/06/2016	407651,912	6201636,939	1828,968	4,3	6,1
<u>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR</u>						
2	17/05/2016	407651,919	6201636,915	1829,024	1,0	1,0
3	07/06/2016	407651,894	6201636,945	1828,987	1,0	1,0

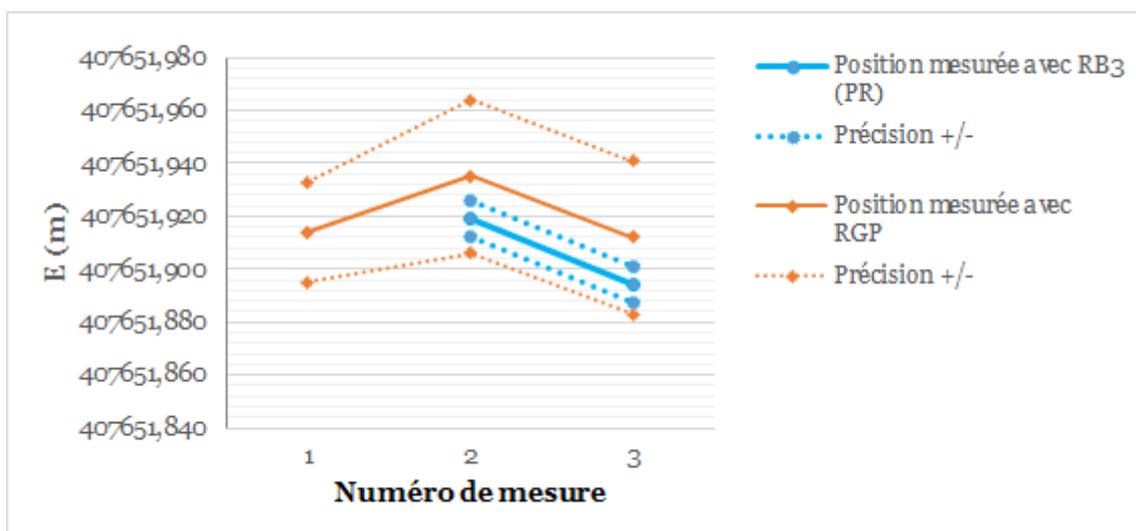


Figure A1.58. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA13 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

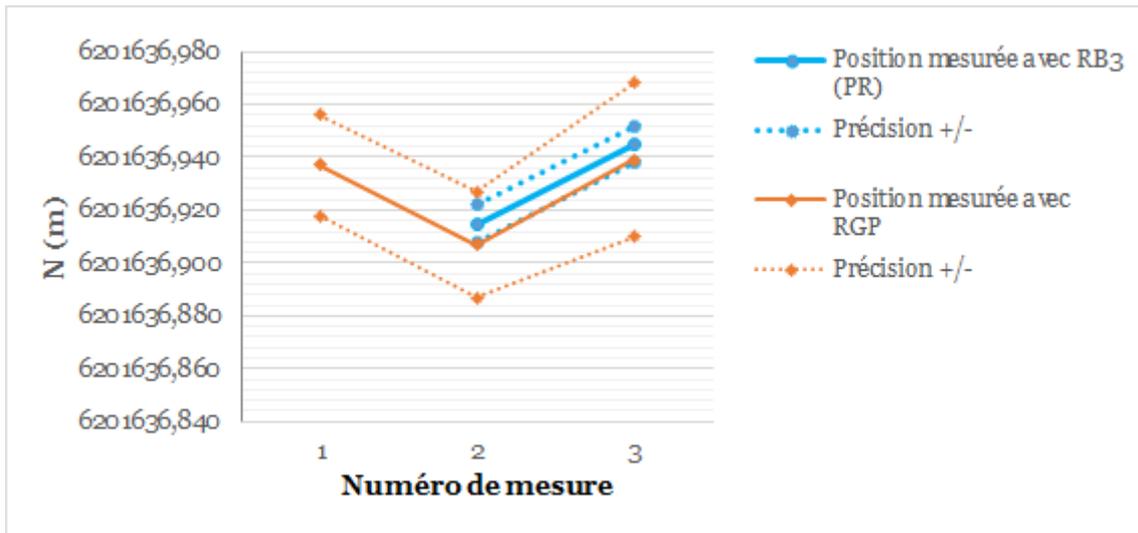


Figure A1.59. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA13 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

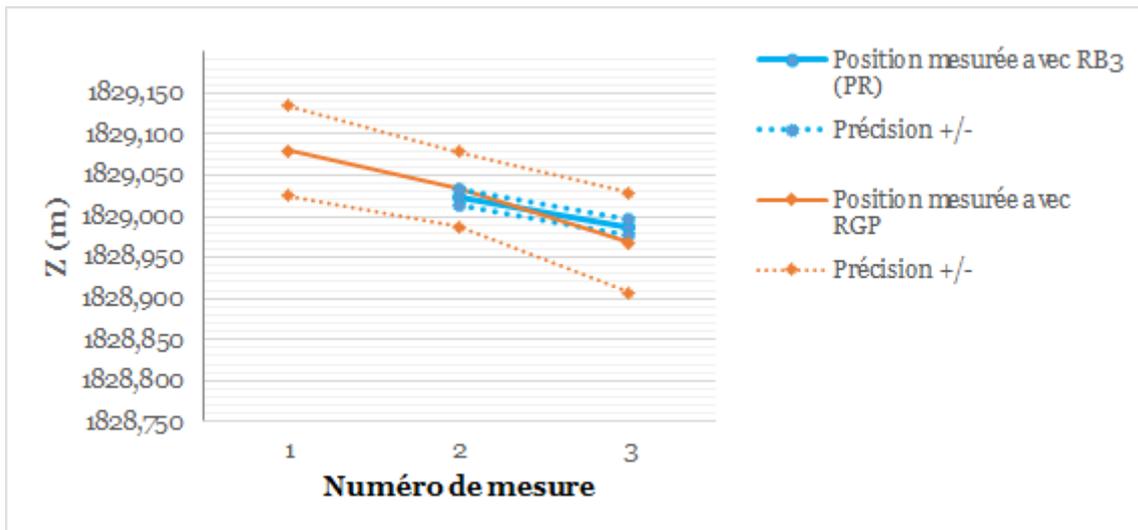


Figure A1.60. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA13 du réseau de détail n°1.

## Point RDA14 du réseau de détail n°1

Tableau A1.21. Coordonnées du point RDA14 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<i>Méthode de positionnement multistations RGP</i>						
1	30/10/2014	407681,018	6201526,140	1806,838	2,8	5,6
2	07/06/2016	407681,029	6201526,091	1806,691	4,3	5,9
<i>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR</i>						
2	07/06/2016	407681,006	6201526,101	1806,698	1,0	1,0

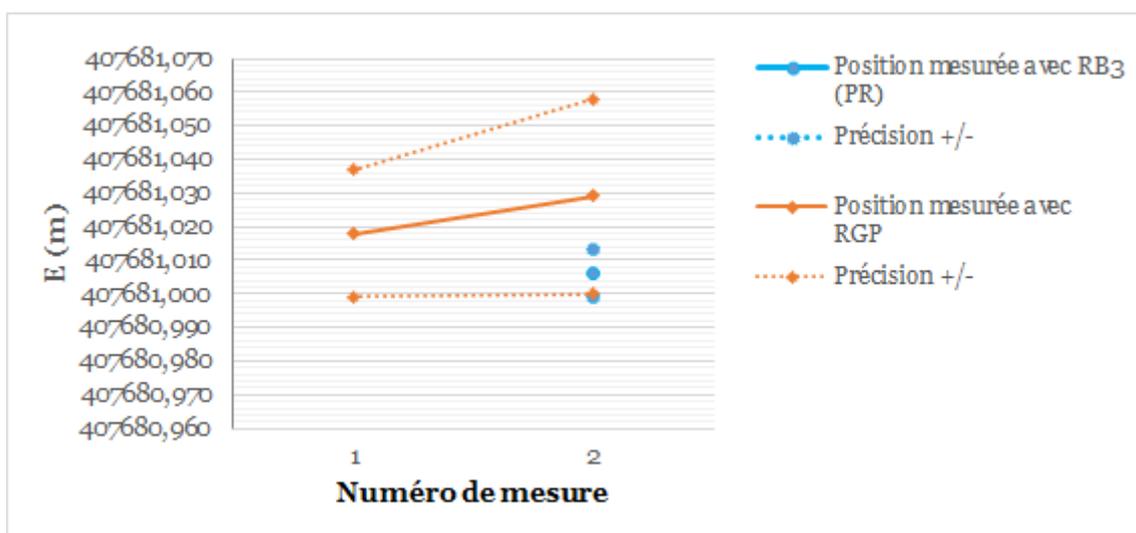


Figure A1.61. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA14 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

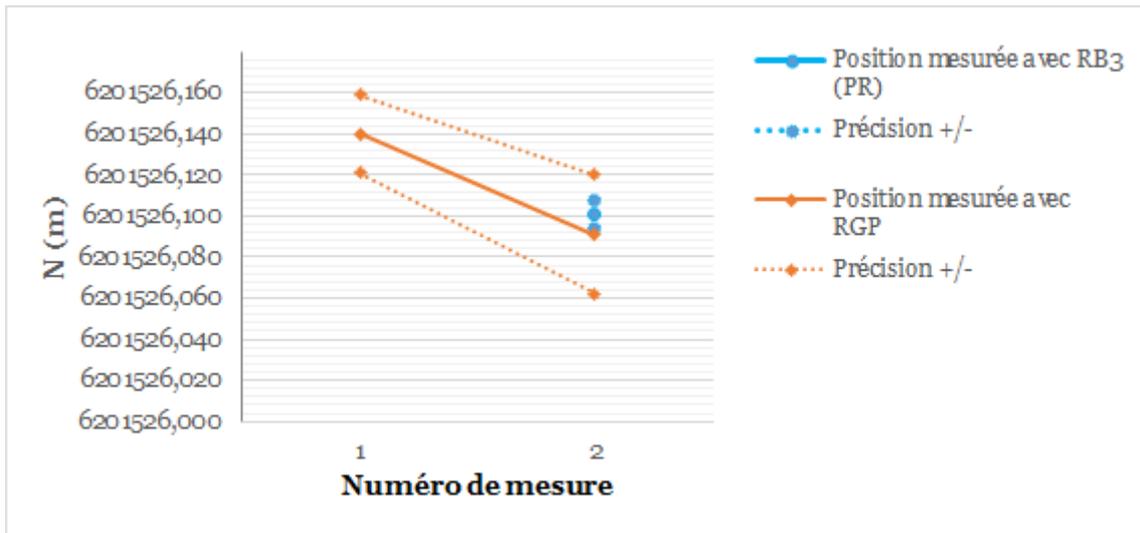


Figure A1.62. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA14 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

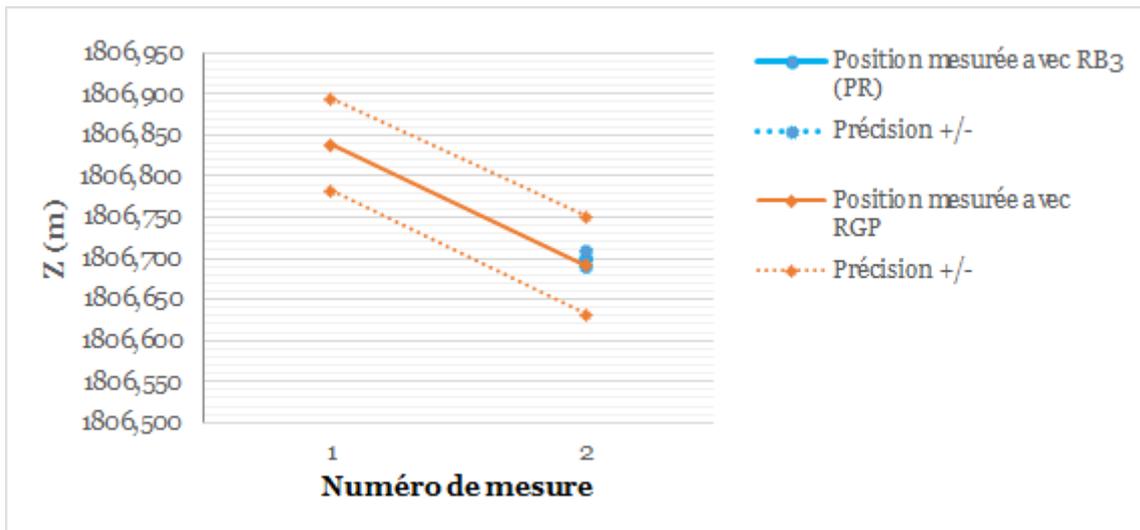


Figure A1.63. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA14 du réseau de détail n°1.

## Point RDA15 du réseau de détail n°1

Tableau A1.22. Coordonnées du point RDA15 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<u>Méthode de positionnement multistations RGP</u>						
1	30/10/2014	407657,989	6201461,585	1824,639	2,8	5,5
2	17/05/2016	407657,992	6201461,564	1824,567	5,0	5,9
3	07/06/2016	407657,970	6201461,515	1824,519	4,0	5,3
<u>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR</u>						
2	17/05/2016	407657,973	6201461,555	1824,569	1,0	1,0
3	07/06/2016	407657,958	6201461,532	1824,556	1,0	1,0

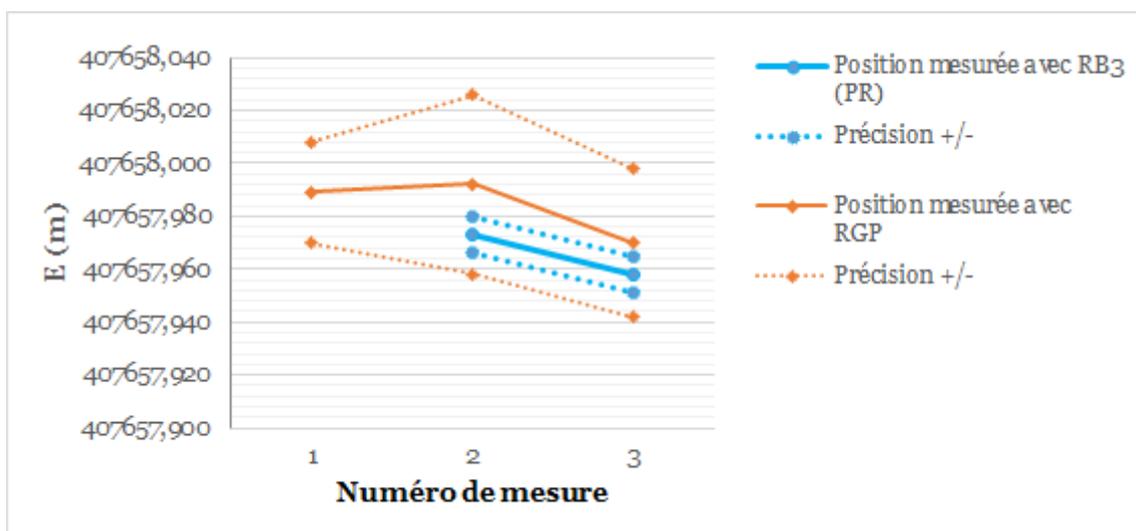


Figure A1.64. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA15 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

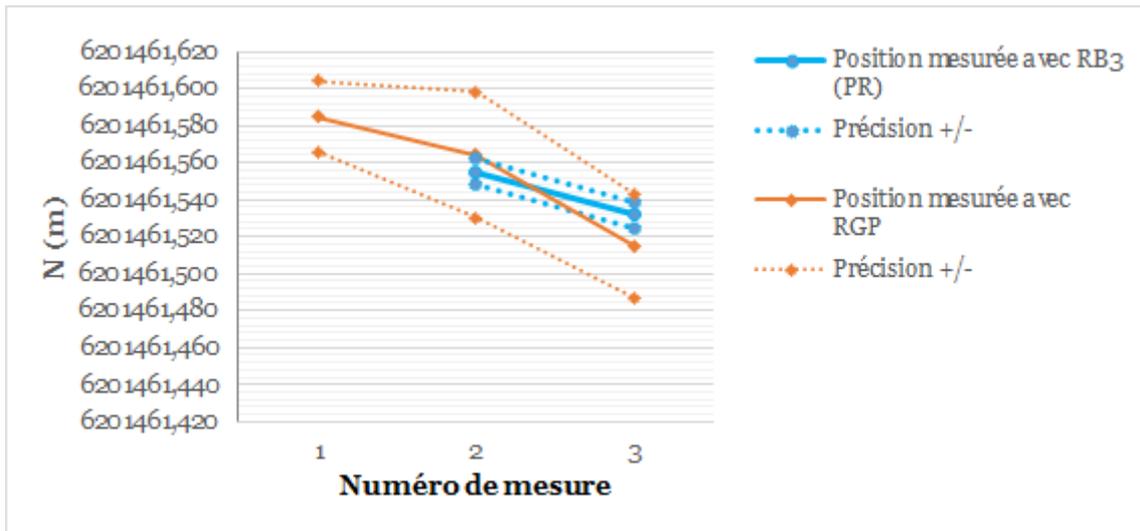


Figure A1.65. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA15 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

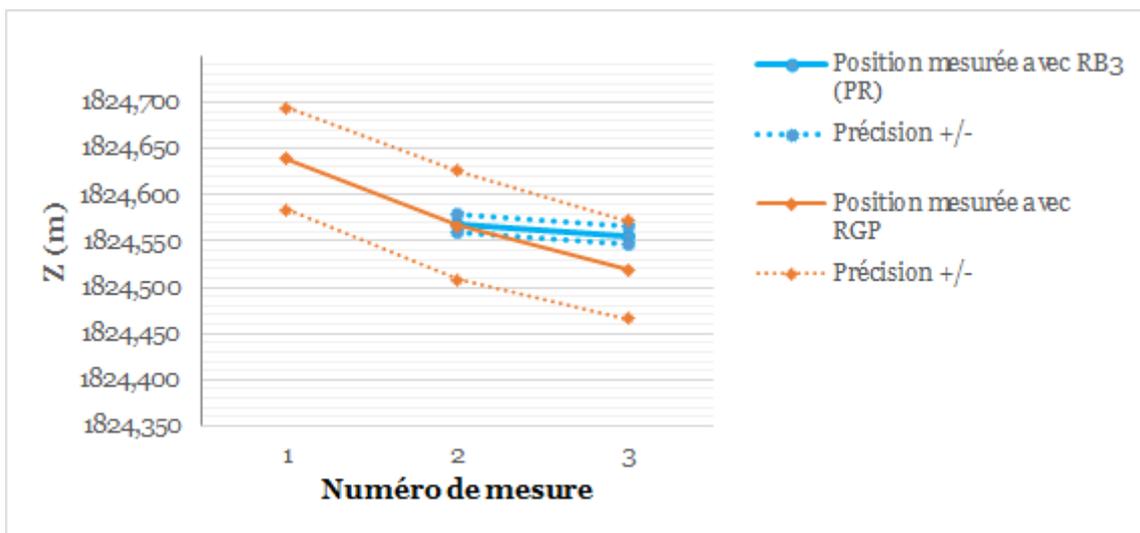


Figure A1.66. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA15 du réseau de détail n°1.

## Point RDA16 du réseau de détail n°1

Tableau A1.23. Coordonnées du point RDA16 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<i>Méthode de positionnement multistations RGP</i>						
1	30/10/2014	407651,993	6201371,618	1798,255	2,8	5,4
2	07/06/2016	407651,995	6201371,529	1798,113	4,5	5,3
<i>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR</i>						
2	07/06/2016	407651,988	6201371,548	1798,112	1,0	1,0

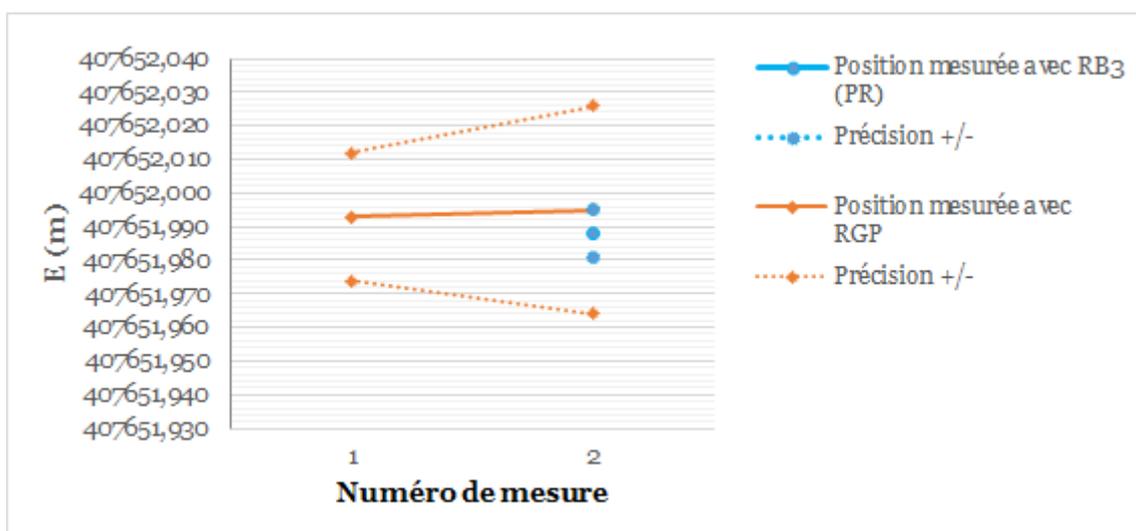


Figure A1.67. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA16 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

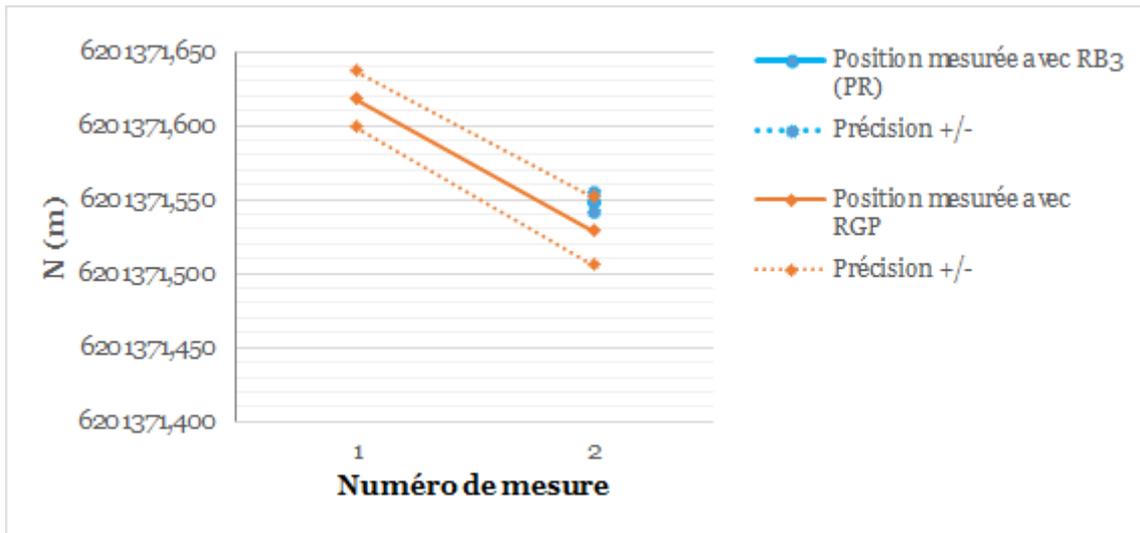


Figure A1.68. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA16 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

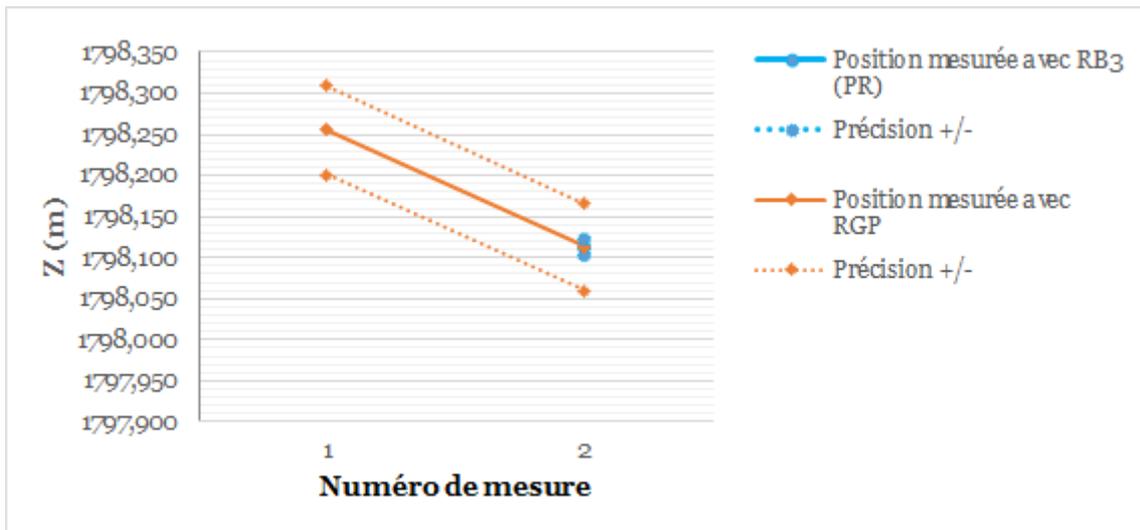


Figure A1.69. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA16 du réseau de détail n°1.

## Point RDA17 du réseau de détail n°1

Tableau A1.24. Coordonnées du point RDA17 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<i>Méthode de positionnement multistations RGP</i>						
1	30/10/2014	407714,463	6201217,816	1769,417	2,9	5,0
2	07/06/2016	407714,451	6201217,806	1769,412	3,8	6,1
<i>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR</i>						
2	07/06/2016	407714,443	6201217,817	1769,394	1,0	1,0

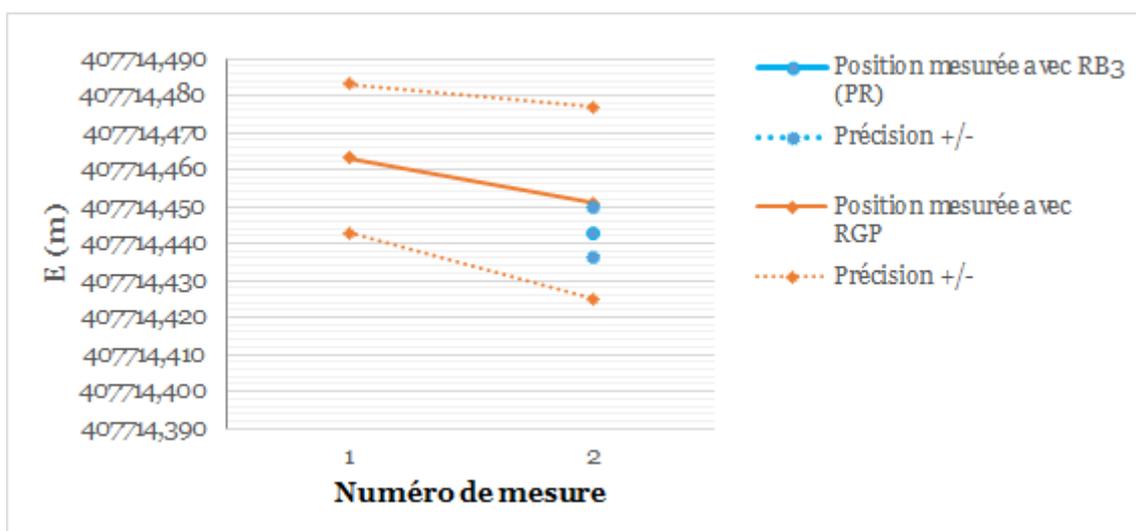


Figure A1.70. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA17 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

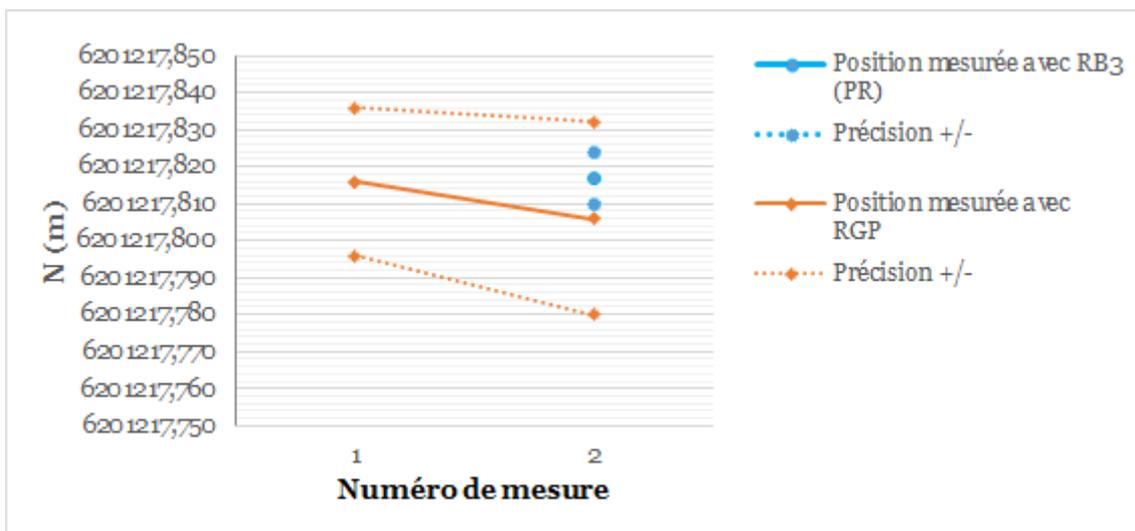


Figure A1.71. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA17 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

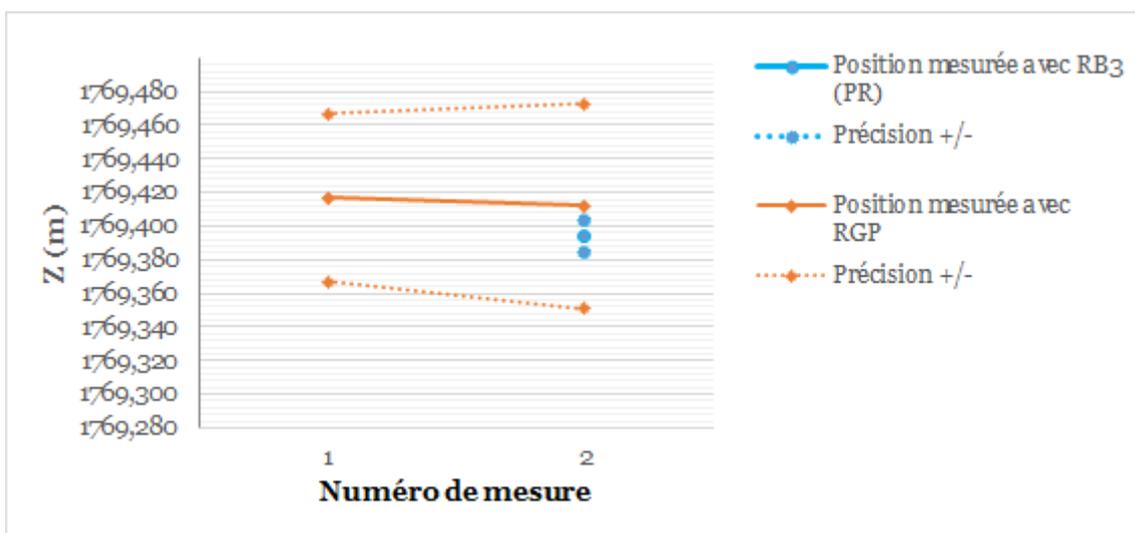


Figure A1.72. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA17 du réseau de détail n°1.

## Point RDA18 du réseau de détail n°1

Tableau A1.25. Coordonnées du point RDA18 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<i>Méthode de positionnement multistations RGP</i>						
1	30/10/2014	407673,691	6201184,809	1790,152	2,9	4,9
2	07/06/2016	407673,707	6201184,761	1790,126	3,4	6,9
<i>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR</i>						
2	07/06/2016	407673,692	6201184,776	1790,122	1,0	1,0

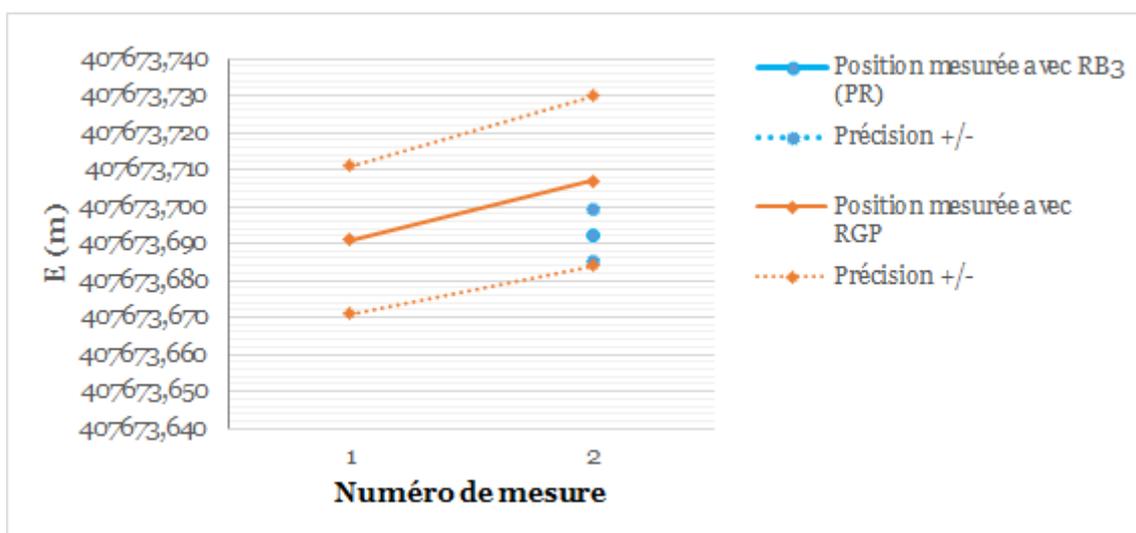


Figure A1.73. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA18 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

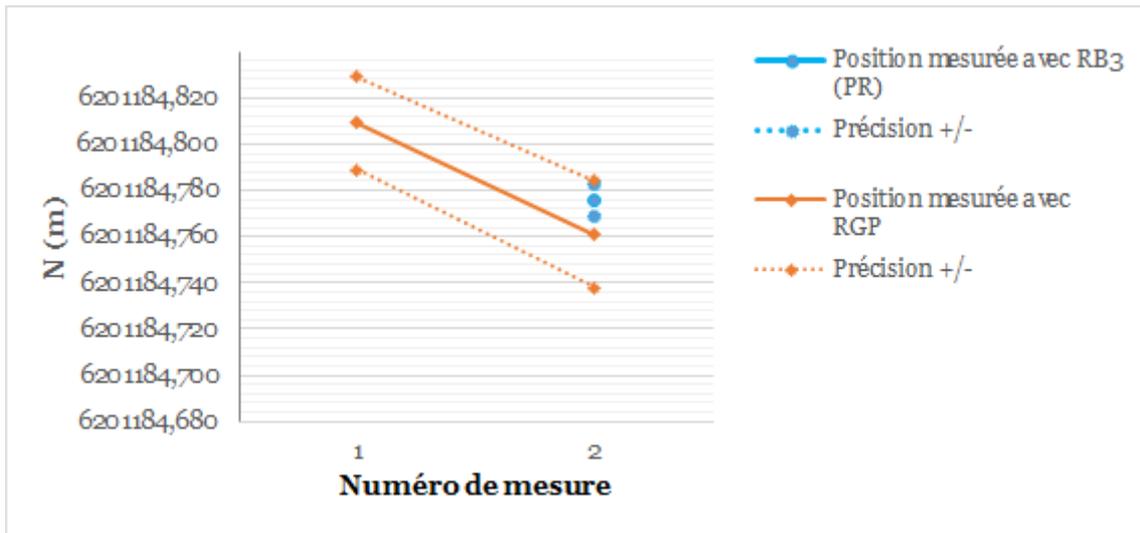


Figure A1.74. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA18 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

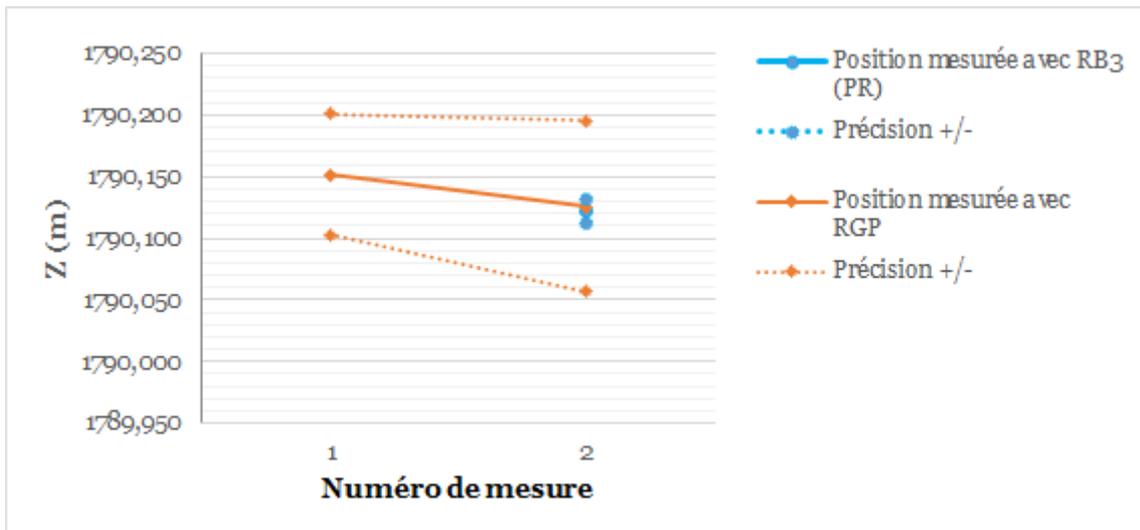


Figure A1.75. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA18 du réseau de détail n°1.

## Point RDA19 du réseau de détail n°1

Tableau A1.26. Coordonnées du point RDA19 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<i>Méthode de positionnement multistations RGP</i>						
1	30/10/2014	407573,737	6201176,118	1822,136	6,1	9,9
2	07/06/2016	407573,717	6201176,078	1822,074	3,6	6,2
<i>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR</i>						
2	07/06/2016	407573,701	6201176,092	1822,098	1,0	1,0

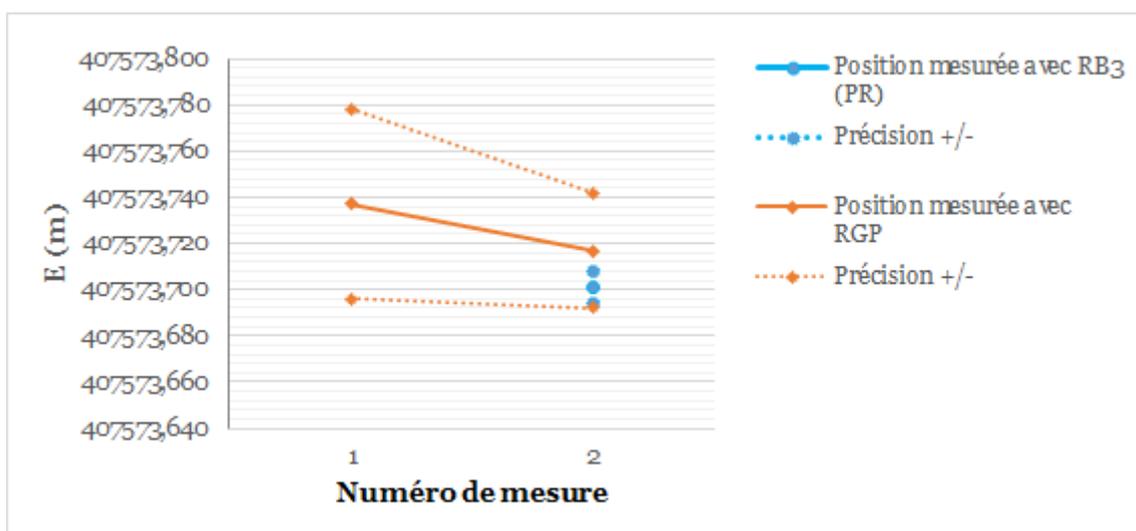


Figure A1.76. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA19 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

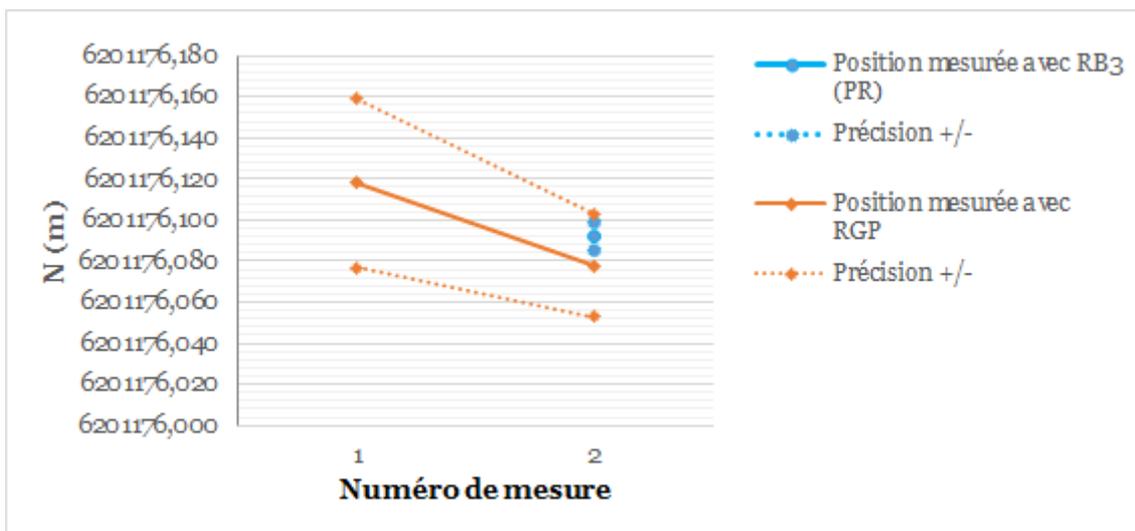


Figure A1.77. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA19 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

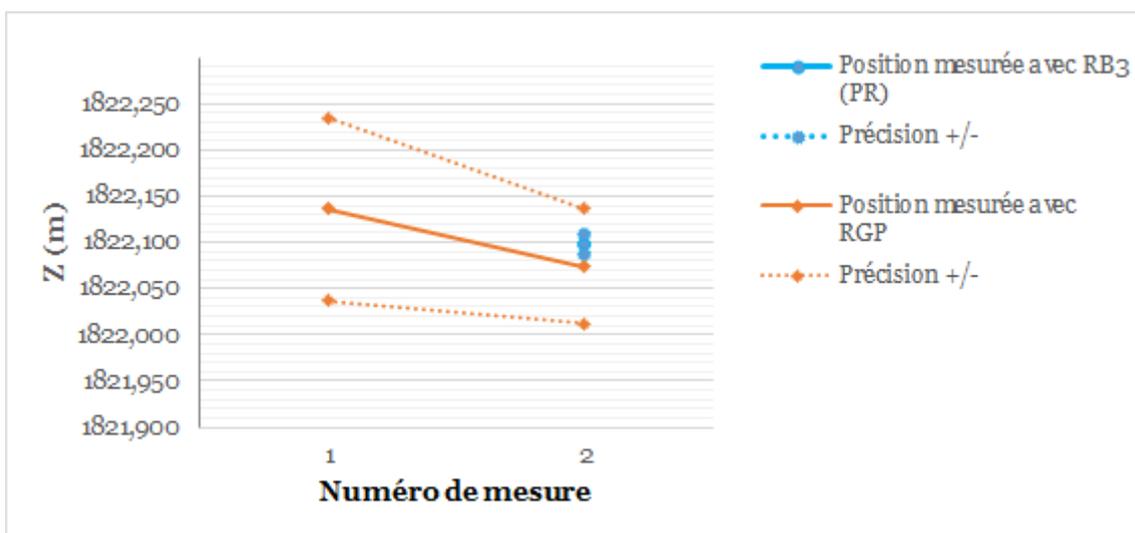


Figure A1.78. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA19 du réseau de détail n°1.

## Point RDA20 du réseau de détail n°1

Tableau A1.27. Coordonnées du point RDA20 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<i>Méthode de positionnement multistations RGP</i>						
1	30/10/2014	407554,212	6201528,030	1811,953	2,9	5,3
2	07/06/2016	407554,195	6201527,958	1811,924	4,0	5,3
<i>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR</i>						
2	07/06/2016	407554,188	6201527,962	1811,937	1,0	1,0

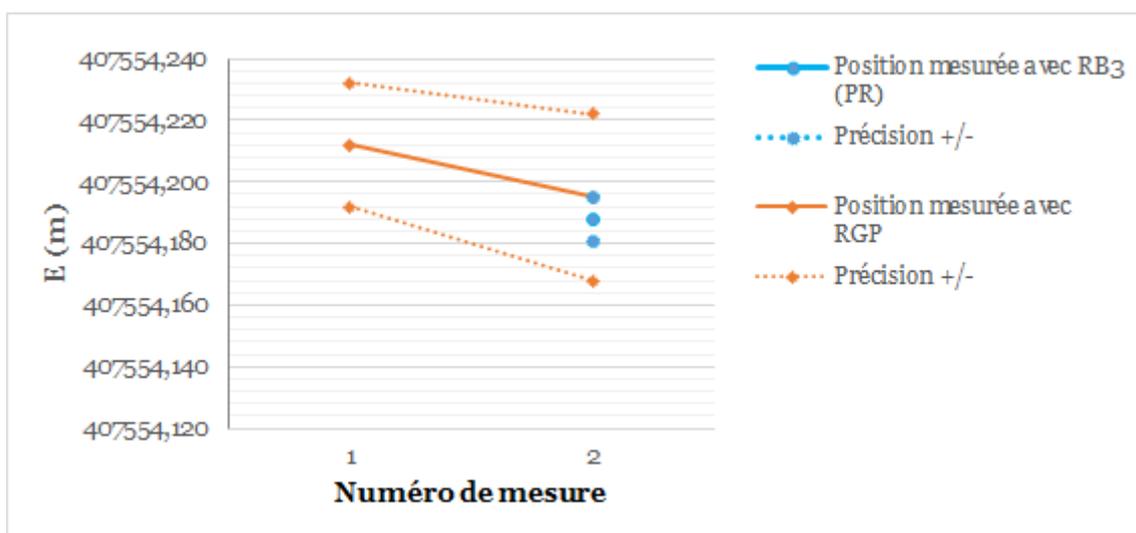


Figure A1.79. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA20 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

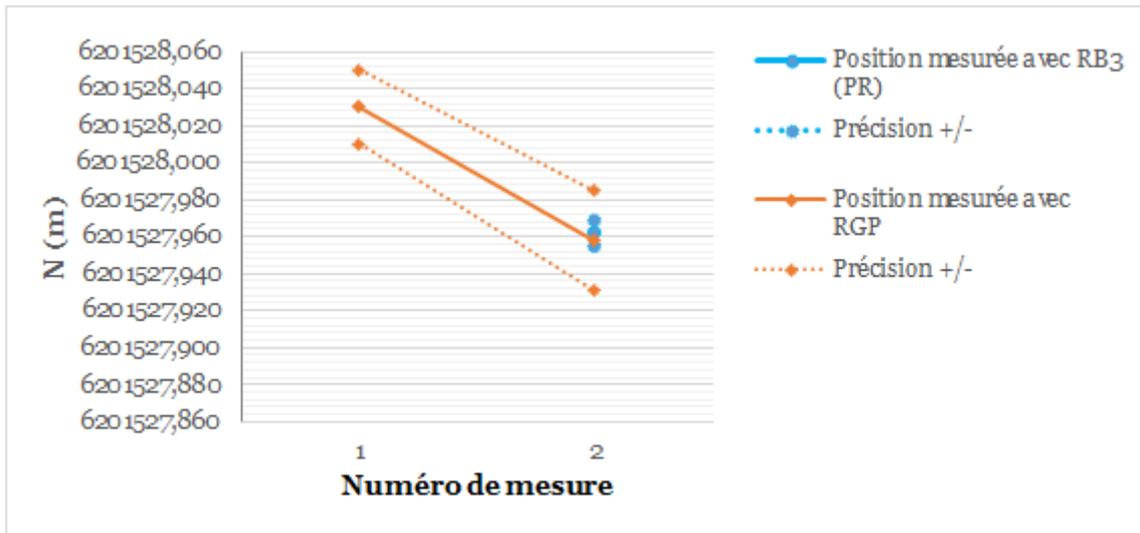


Figure A1.80. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA20 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

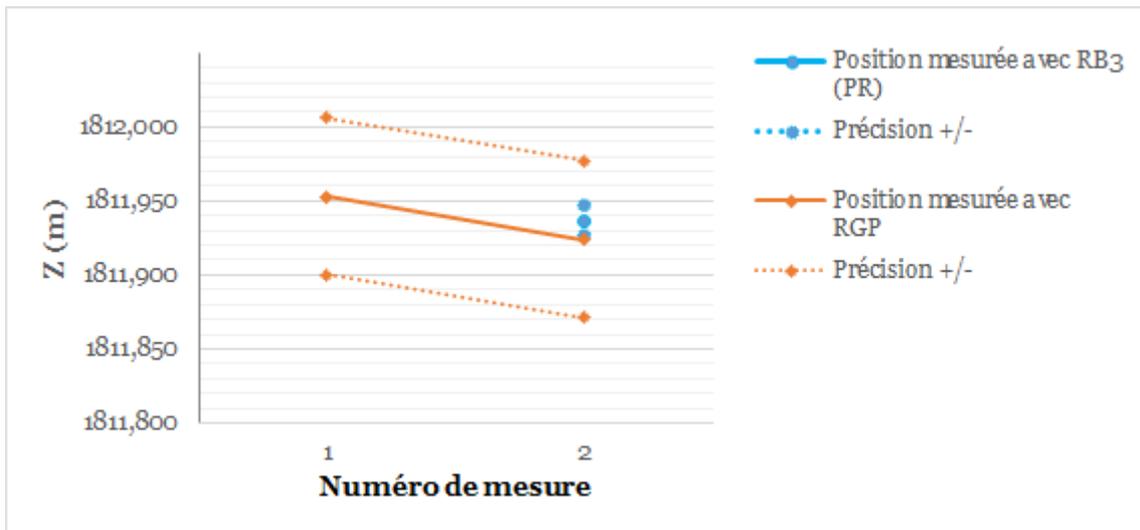


Figure A1.81. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA20 du réseau de détail n°1.

## Point RDB1 du réseau de détail n°2

Tableau A1.28. Coordonnées du point RDB1 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<u>Méthode de positionnement multistations RGP</u>						
1	09/01/2015	408844,256	6200996,864	1160,385	3,0	5,3
2	20/05/2016	408844,271	6200996,868	1160,400	2,9	5,9
3	09/06/2016	408844,274	6200996,848	1160,409	3,4	5,1
<u>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR</u>						
2	20/05/2016	408844,259	6200996,865	1160,391	1,0	1,2
3	09/06/2016	408844,262	6200996,861	1160,398	1,0	1,2

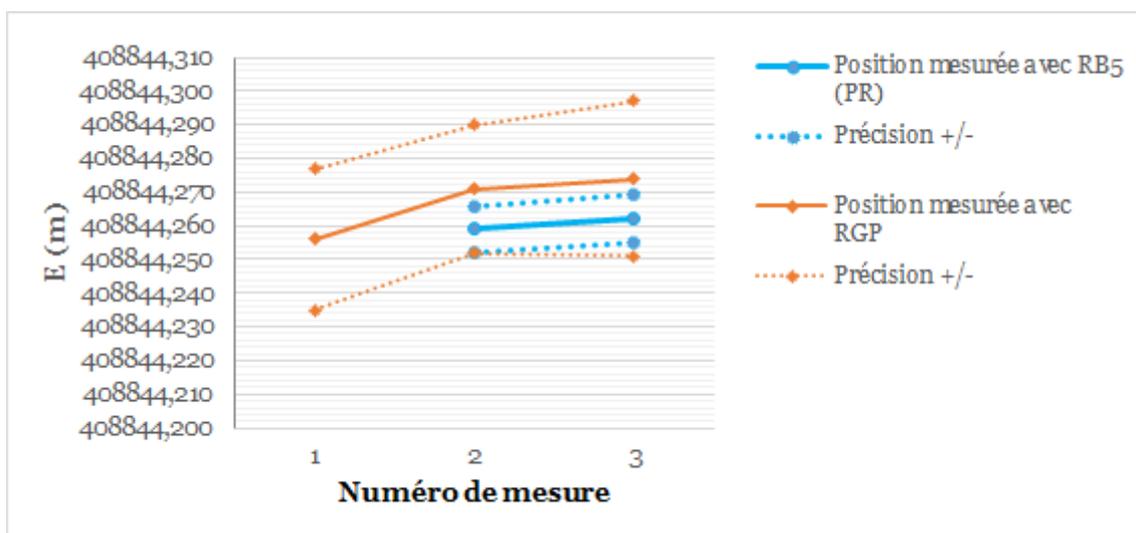


Figure A1.82. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB1 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

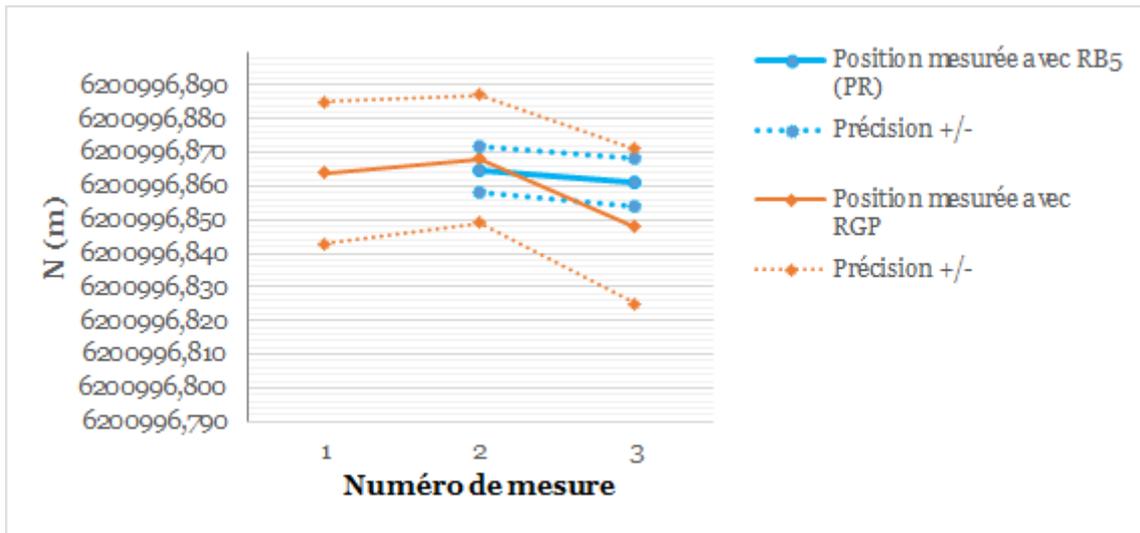


Figure A1.83. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB1 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

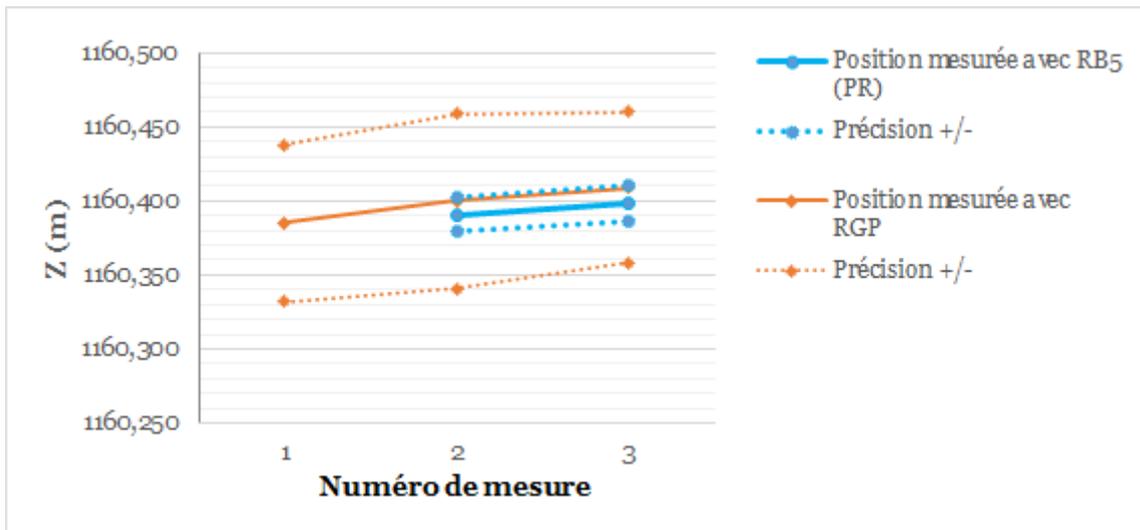


Figure A1.84. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) d du point RDB1 du réseau de détail n°2.

## Point RDB2 du réseau de détail n°2

Tableau A1.29. Coordonnées du point RDB2 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<i>Méthode de positionnement multistations RGP</i>						
1	09/01/2015	408824,107	6201099,946	1167,399	3,4	6,1
2	20/05/2016	408824,093	6201099,952	1167,466	3,2	7,2
3	09/06/2016	408824,134	6201099,947	1167,405	3,6	6,0
<i>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR</i>						
2	20/05/2016	408824,092	6201099,956	1167,431	1,0	1,3
3	09/06/2016	408824,115	6201099,942	1167,412	1,0	1,3

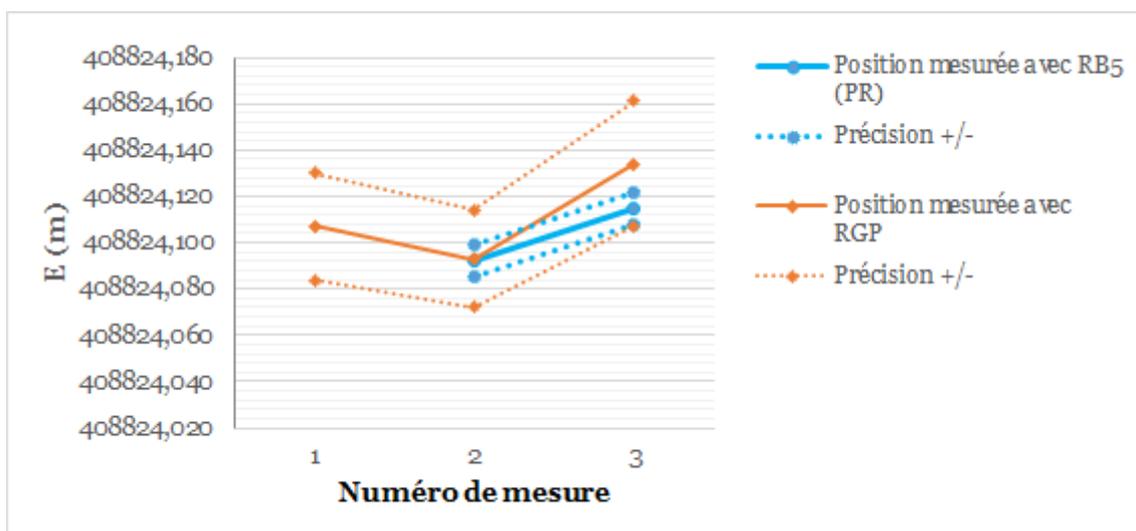


Figure A1.85. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB2 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

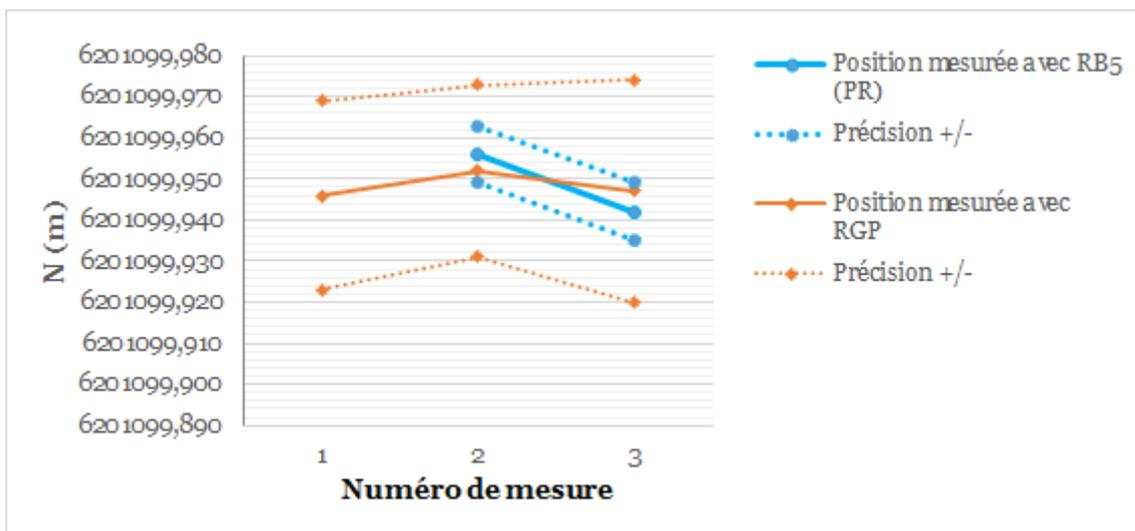


Figure A1.86. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB2 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

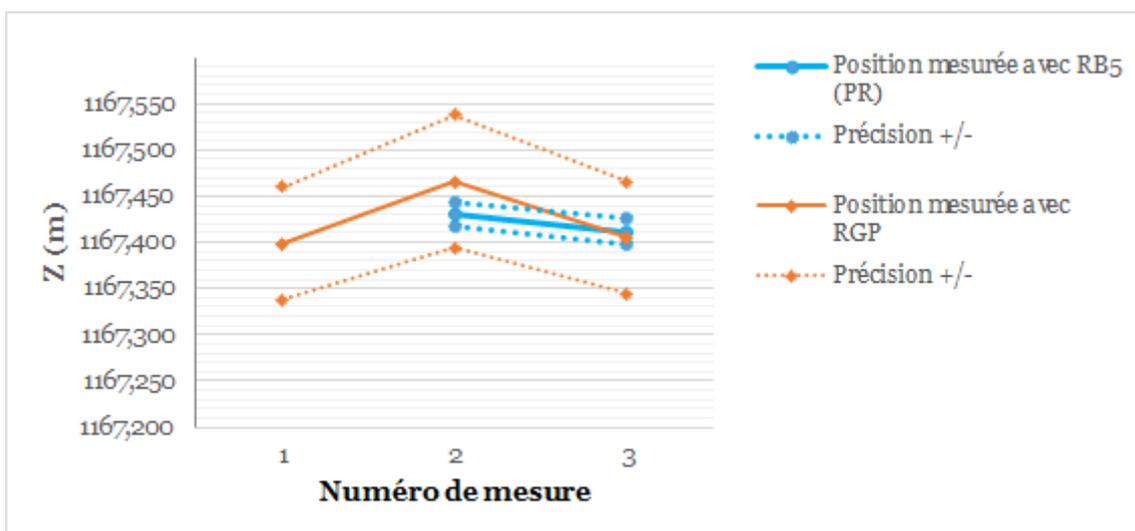


Figure A1.87. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB2 du réseau de détail n°2.

## Point RDB3 du réseau de détail n°2

Tableau A1.30. Coordonnées du point RDB3 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<u>Méthode de positionnement multistations RGP</u>						
1	09/01/2015	408896,078	6201198,207	1152,661	2,9	5,2
2	20/05/2016	408896,063	6201198,201	1152,729	3,4	6,2
3	09/06/2016	408896,080	6201198,187	1152,700	3,8	5,7
<u>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR</u>						
2	20/05/2016	408896,049	6201198,214	1152,756	1,0	1,3
3	09/06/2016	408896,063	6201198,203	1152,746	1,0	1,3

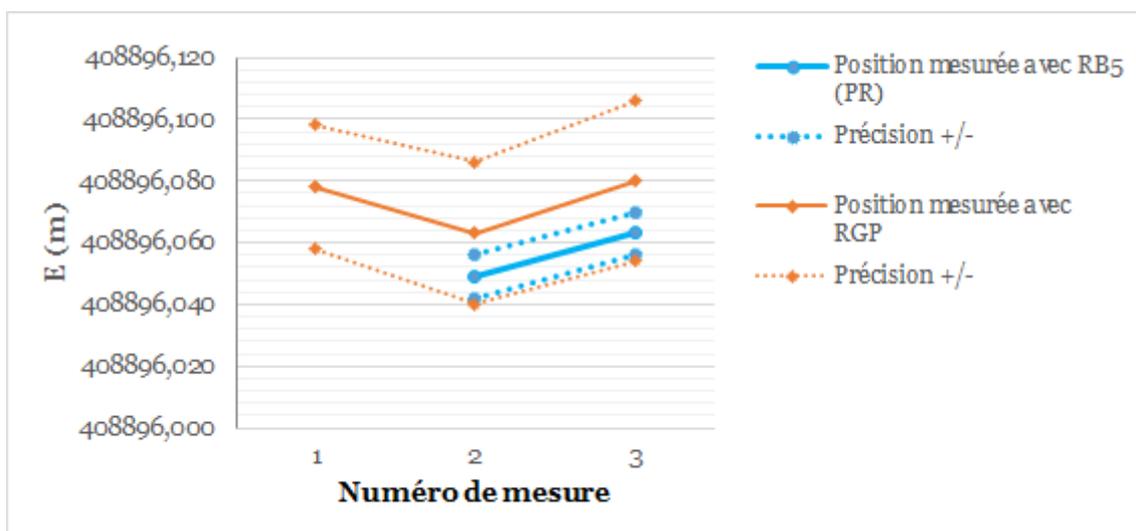


Figure A1.88. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB3 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

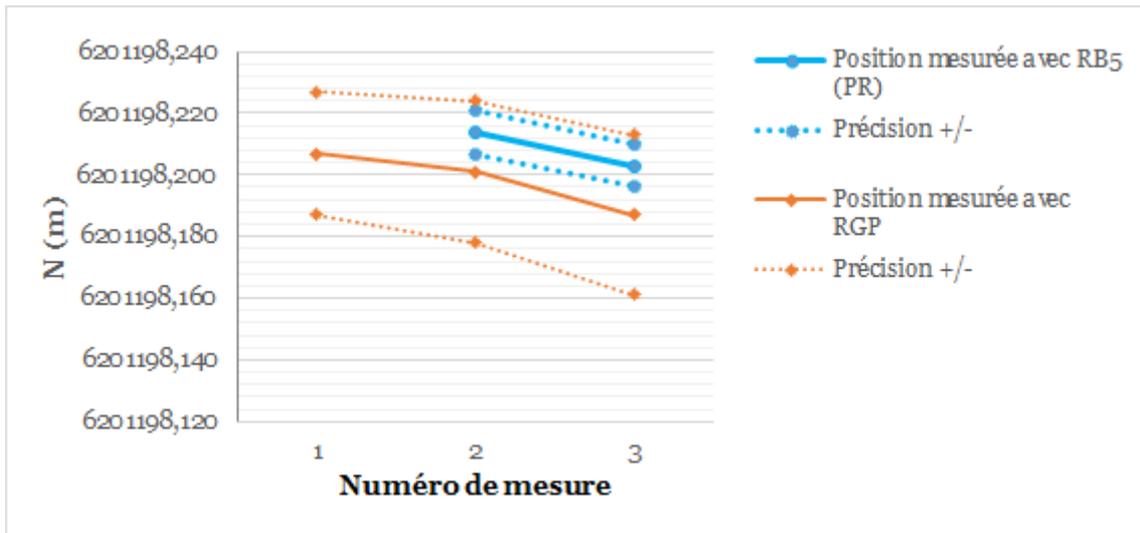


Figure A1.89. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB3 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

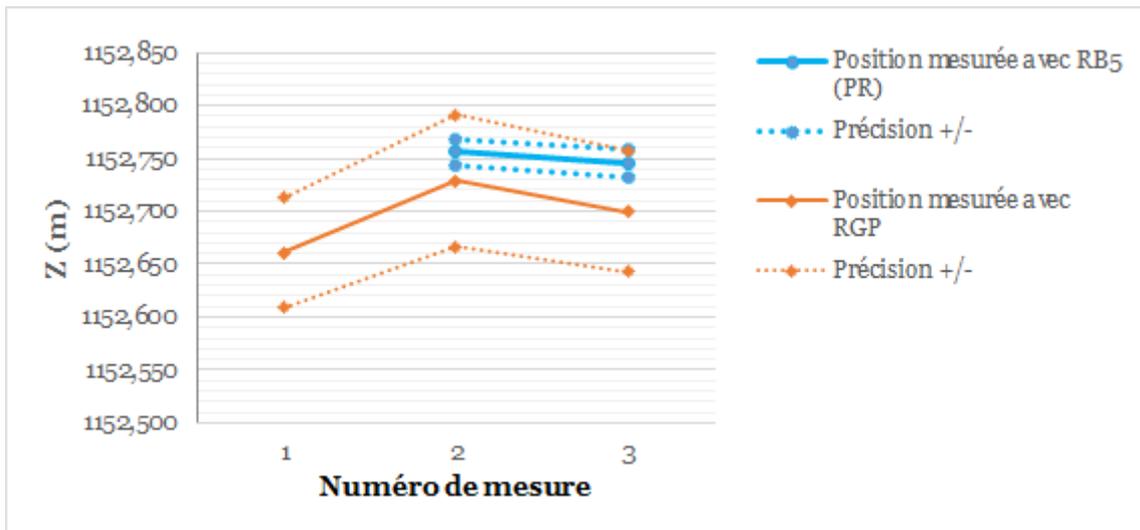


Figure A1.90. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB3 du réseau de détail n°2.

## Point RDB4 du réseau de détail n°2

Tableau A1.31. Coordonnées du point RDB4 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<u>Méthode de positionnement multistations RGP</u>						
1	09/01/2015	408859,722	6201426,416	1124,072	3,4	5,9
2	20/05/2016	408859,705	6201426,276	1124,230	5,1	7,7
3	09/06/2016	408859,763	6201426,390	1124,196	4,6	6,2
<u>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR</u>						
2	20/05/2016	408859,727	6201426,308	1124,199	1,0	1,2
3	09/06/2016	408859,751	6201426,364	1124,189	1,0	1,2

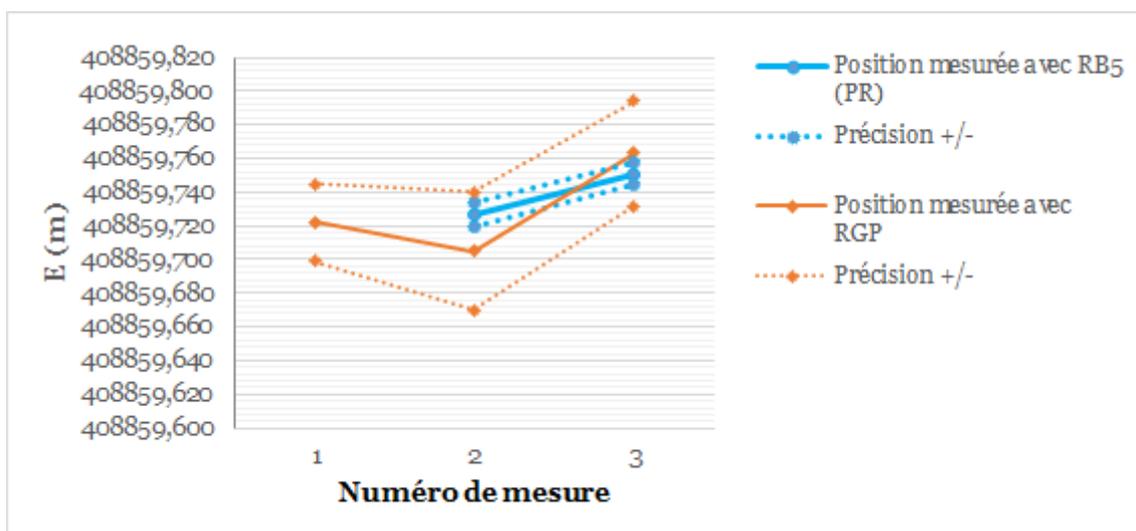


Figure A1.91. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB4 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

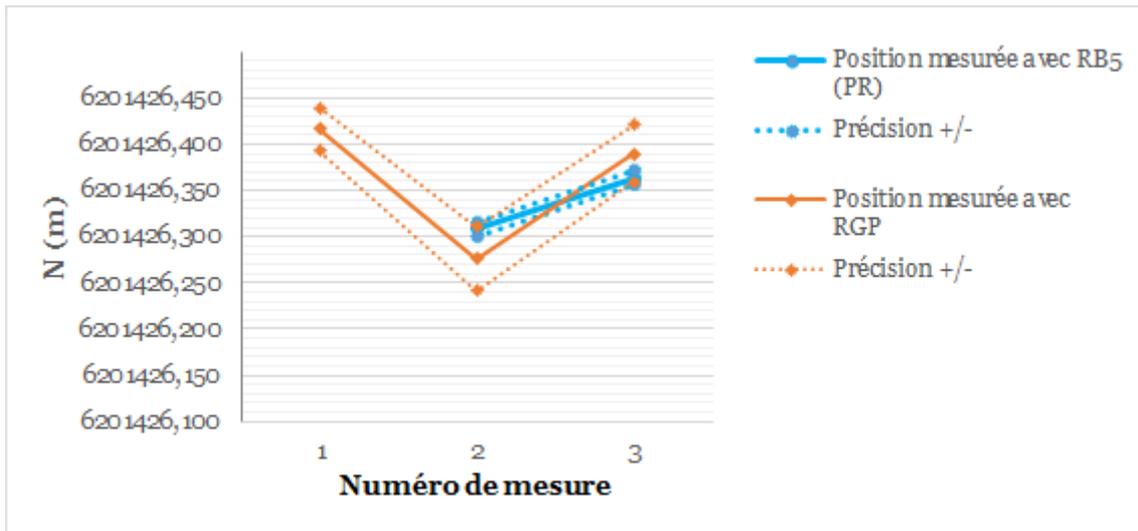


Figure A1.92. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB4 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

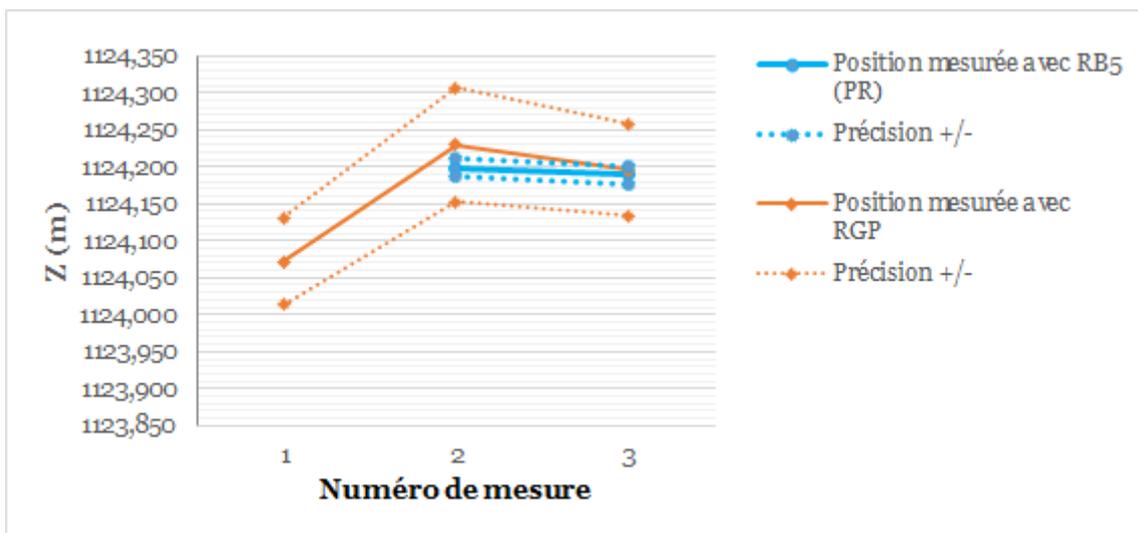


Figure A1.93. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB4 du réseau de détail n°2.

## Point RDB5 du réseau de détail n°2

Tableau A1.32. Coordonnées du point RDB5 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<i>Méthode de positionnement multistations RGP</i>						
1	09/01/2015	408962,453	6201479,186	1107,580	3,7	6,4
2	20/05/2016	408962,489	6201479,123	1107,605	5,1	7,1
3	09/06/2016	408962,467	6201479,175	1107,618	3,6	5,6
<i>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR</i>						
2	20/05/2016	408962,474	6201479,152	1107,606	1,0	1,1
3	09/06/2016	408962,458	6201479,158	1107,606	1,0	1,1

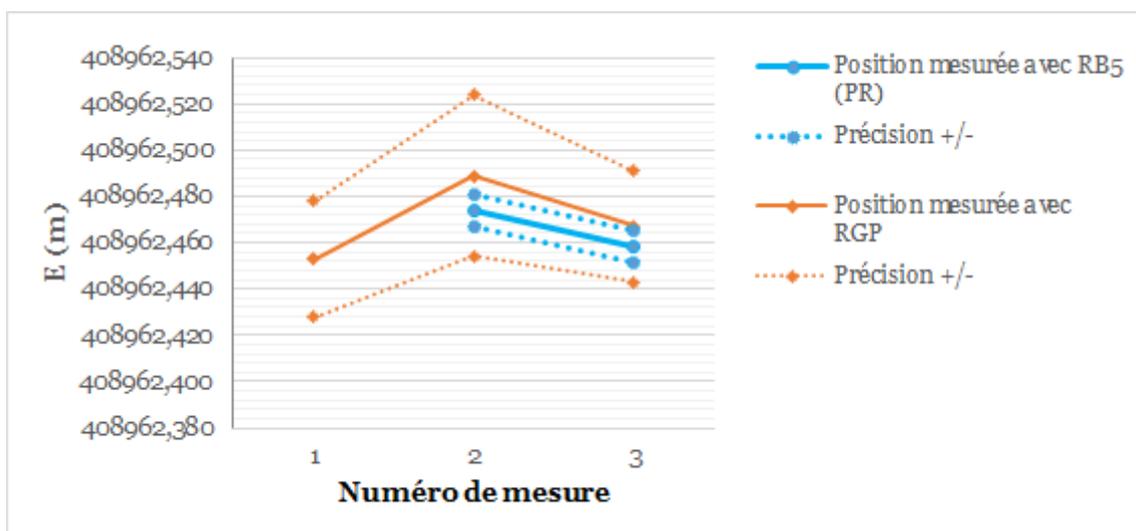


Figure A1.94. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB5 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

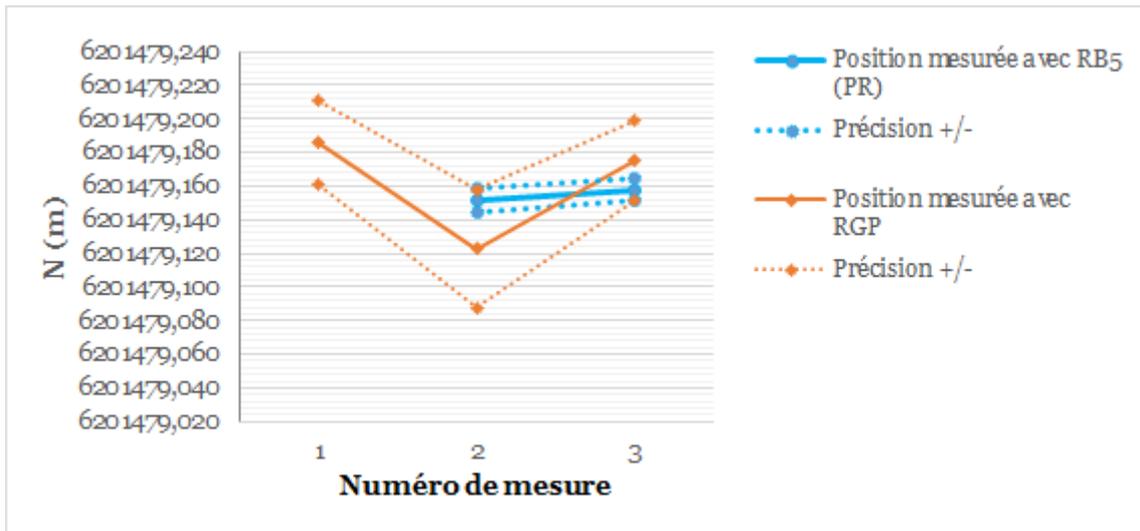


Figure A1.95. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB5 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

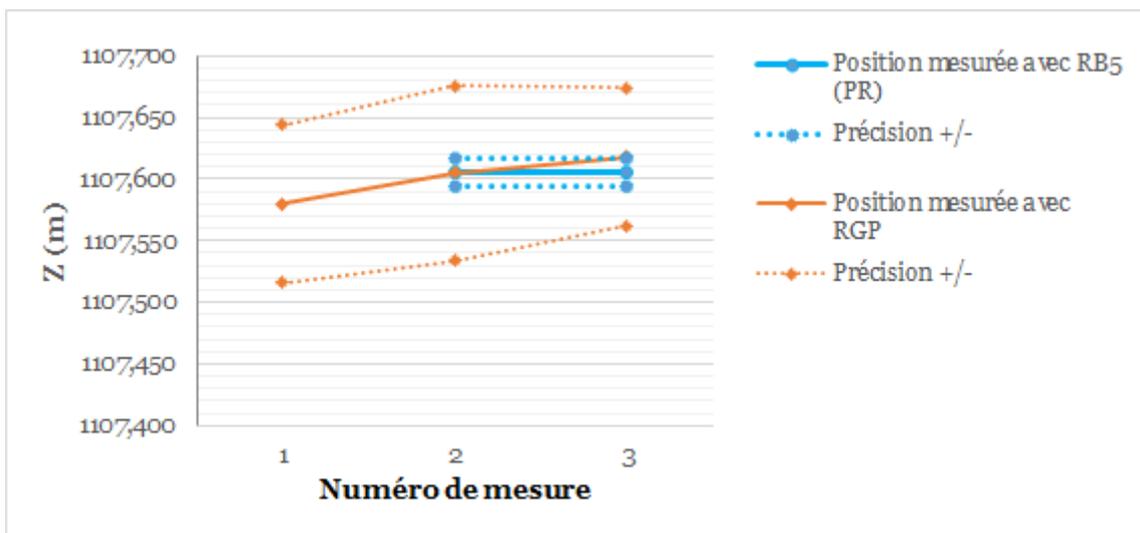


Figure A1.96. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB5 du réseau de détail n°2.

## Point RDB6 du réseau de détail n°2

Tableau A1.33. Coordonnées du point RDB6 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<u>Méthode de positionnement multistations RGP</u>						
1	09/01/2015	408987,773	6201494,971	1102,138	3,0	5,6
2	20/05/2016	408987,774	6201494,898	1102,196	4,6	6,4
3	09/06/2016	408987,776	6201494,938	1102,178	3,6	5,3
<u>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR</u>						
2	20/05/2016	408987,766	6201494,909	1102,166	1,0	1,1
3	09/06/2016	408987,770	6201494,925	1102,156	1,0	1,1

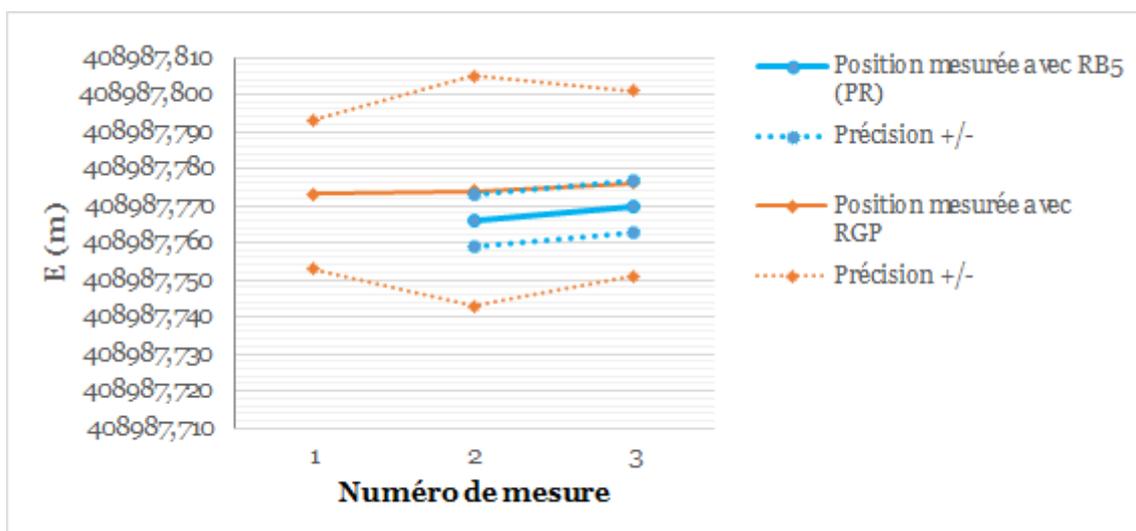


Figure A1.97. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB6 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

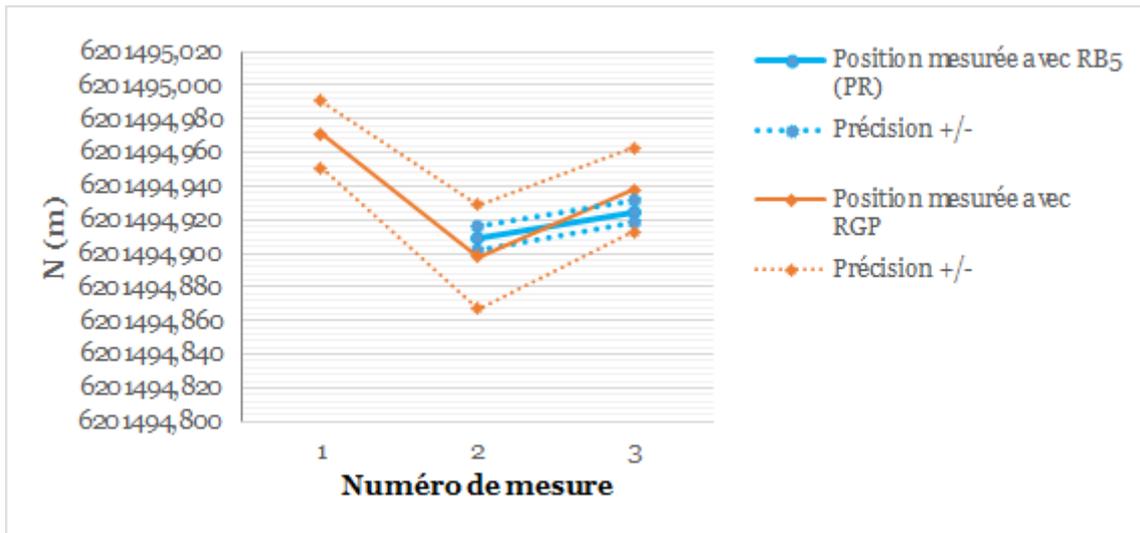


Figure A1.98. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB6 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

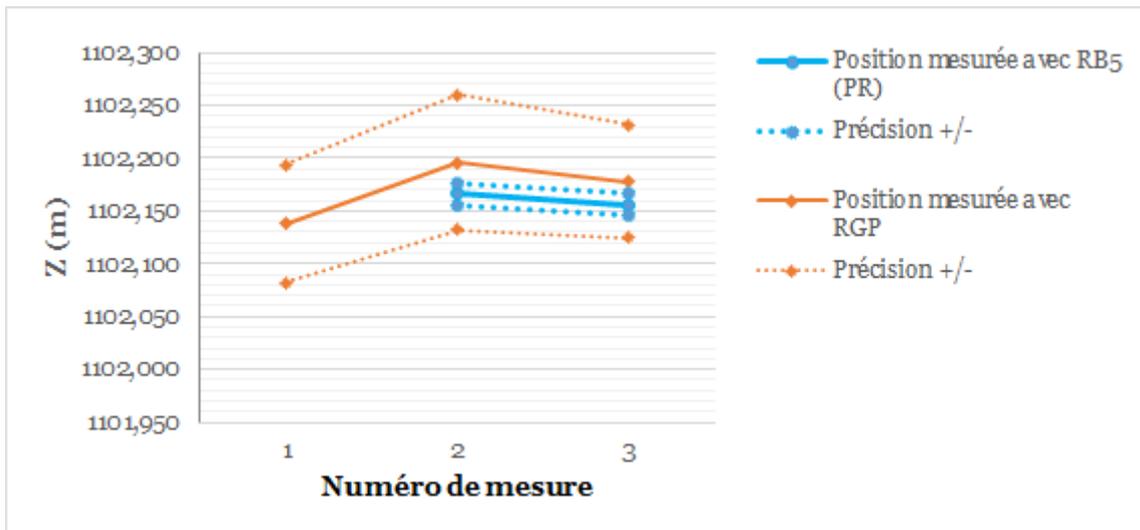


Figure A1.99. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB6 du réseau de détail n°2.

## Point RDB7 du réseau de détail n°2

Tableau A1.34. Coordonnées du point RDB7 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<i>Méthode de positionnement multistations RGP</i>						
1	09/01/2015	408974,200	6201596,907	1096,131	3,2	6,1
2	09/06/2016	408974,232	6201596,872	1096,156	3,7	6,8
<i>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR</i>						
2	09/06/2016	408974,219	6201596,889	1096,132	1,0	1,2

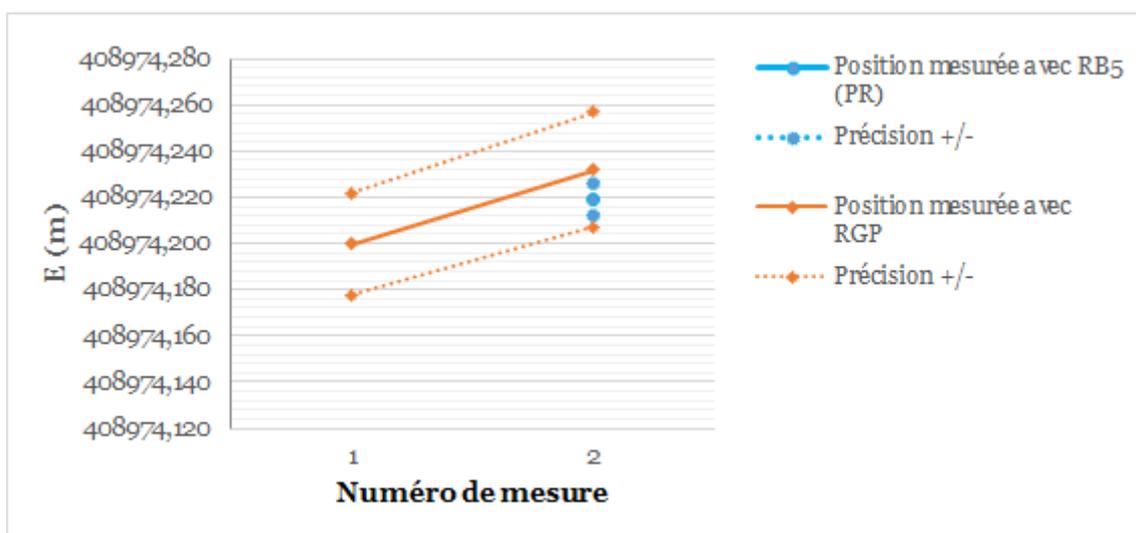


Figure A1.100. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB7 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

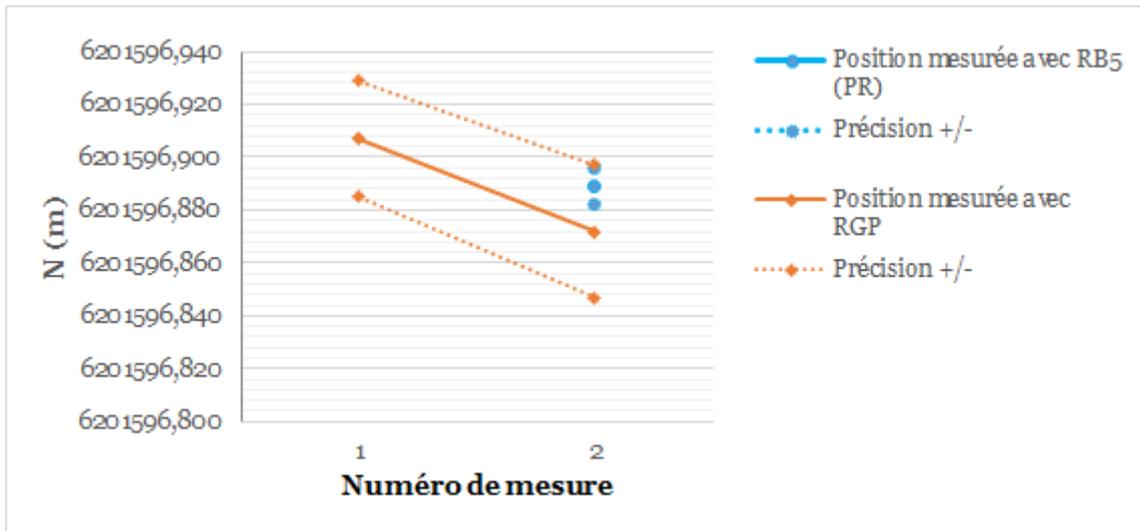


Figure A1.101. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB7 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

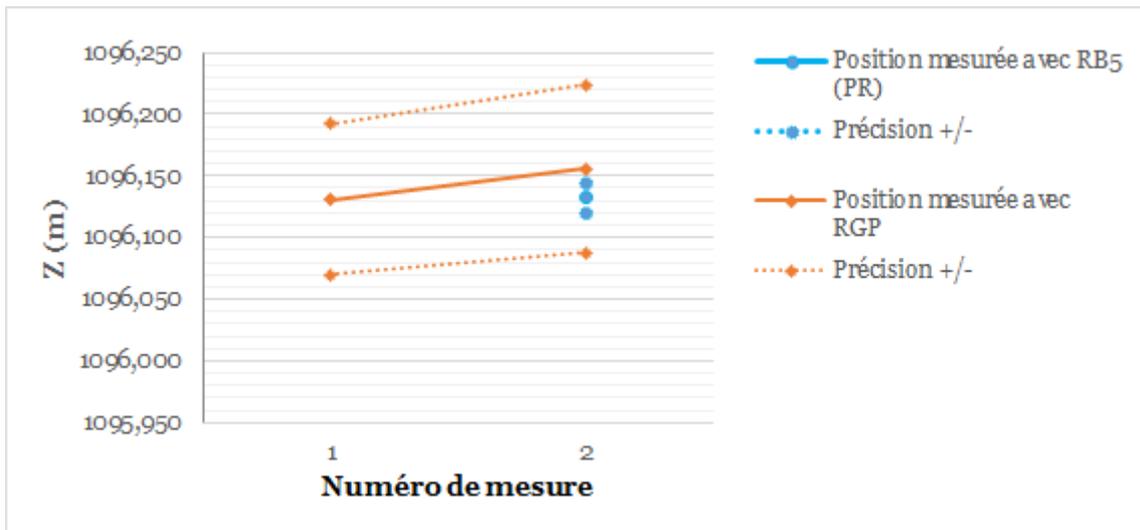


Figure A1.102. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB7 du réseau de détail n°2.

## Point RDB8 du réseau de détail n°2

Tableau A1.35. Coordonnées du point RDB8 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<i>Méthode de positionnement multistations RGP</i>						
1	09/01/2015	409024,600	6201667,298	1082,440	3,3	6,5
2	20/05/2016	409024,660	6201667,266	1082,443	4,3	8,1
3	09/06/2016	409024,617	6201667,254	1082,423	4,5	10,3
<i>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR</i>						
2	20/05/2016	409024,628	6201667,268	1082,443	1,0	1,2
3	09/06/2016	409024,602	6201667,264	1082,433	1,0	1,2

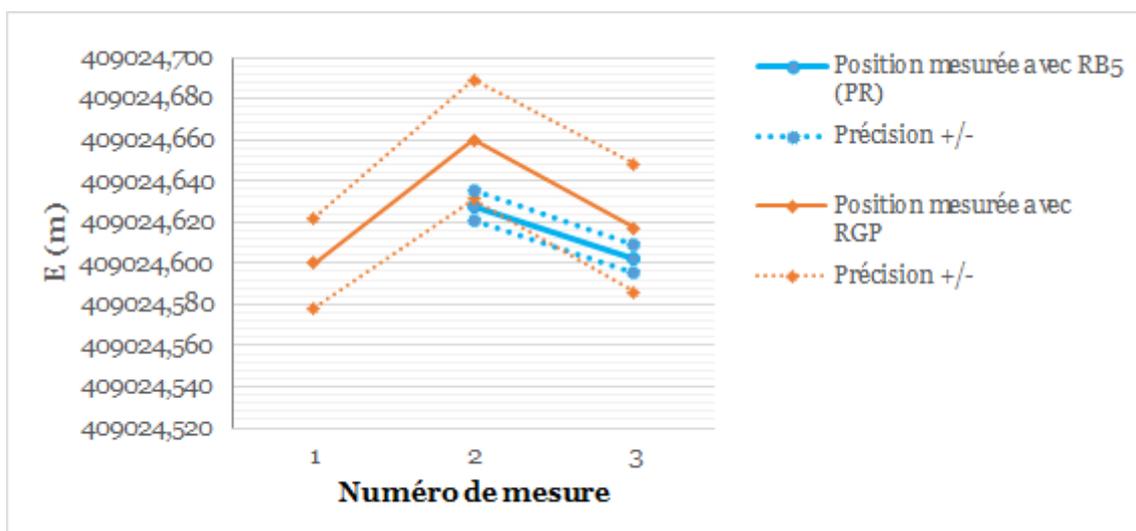


Figure A1.103. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB8 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

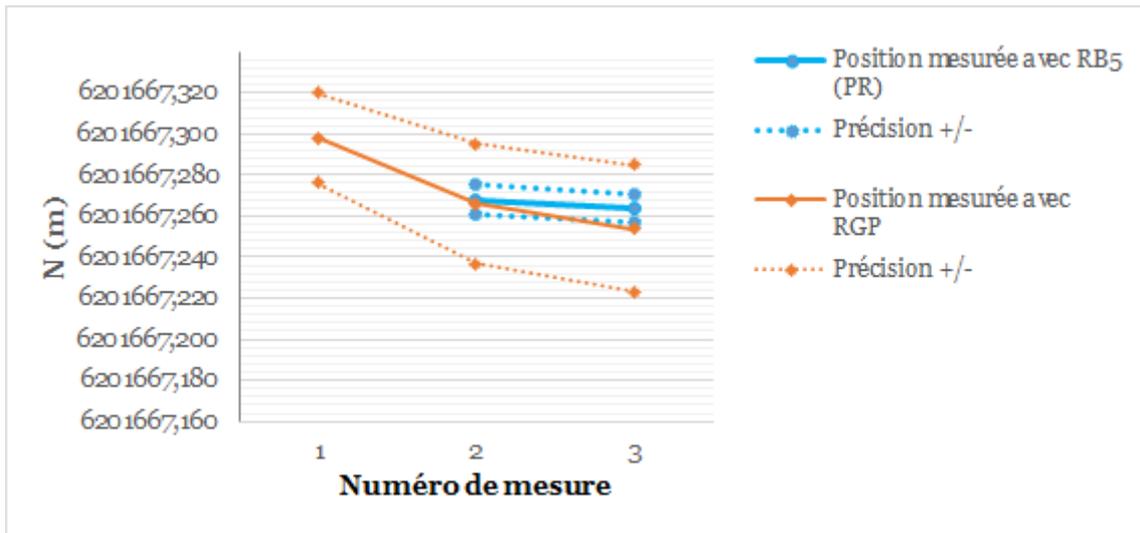


Figure A1.104. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB8 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

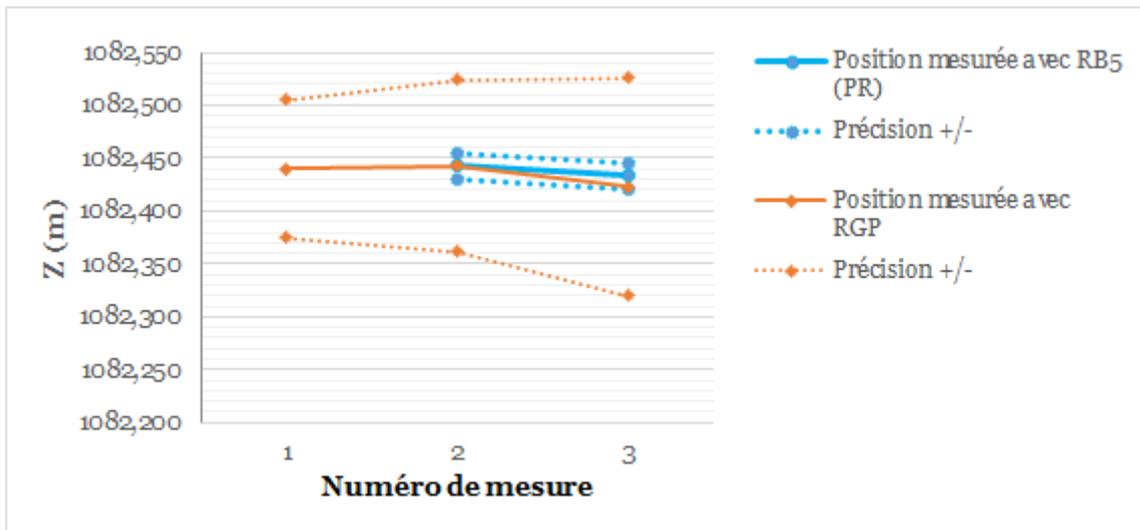


Figure A1.105. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB8 du réseau de détail n°2.

## Point RDB9 du réseau de détail n°2

Tableau A1.36. Coordonnées du point RDB9 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<u>Méthode de positionnement multistations RGP</u>						
1	09/01/2015	409002,479	6201883,689	1079,538	3,3	6,8
2	20/05/2016	409002,483	6201883,683	1079,562	3,8	5,4
3	09/06/2016	409002,527	6201883,648	1079,479	3,3	7,2
<u>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR</u>						
2	20/05/2016	409002,492	6201883,687	1079,530	1,0	1,0
3	09/06/2016	409002,513	6201883,662	1079,520	1,0	1,0

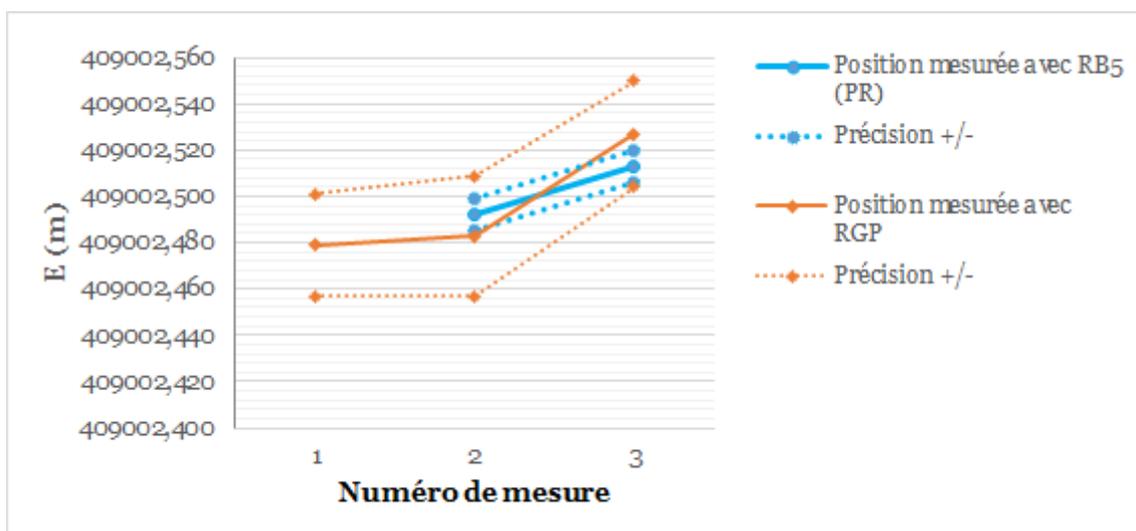


Figure A1.106. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB9 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

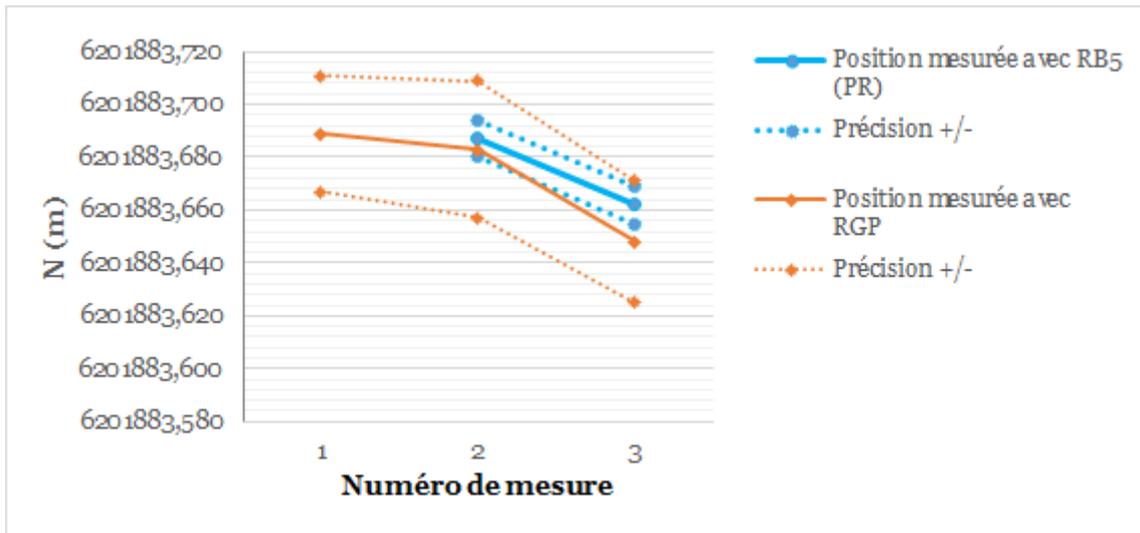


Figure A1.107. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB9 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

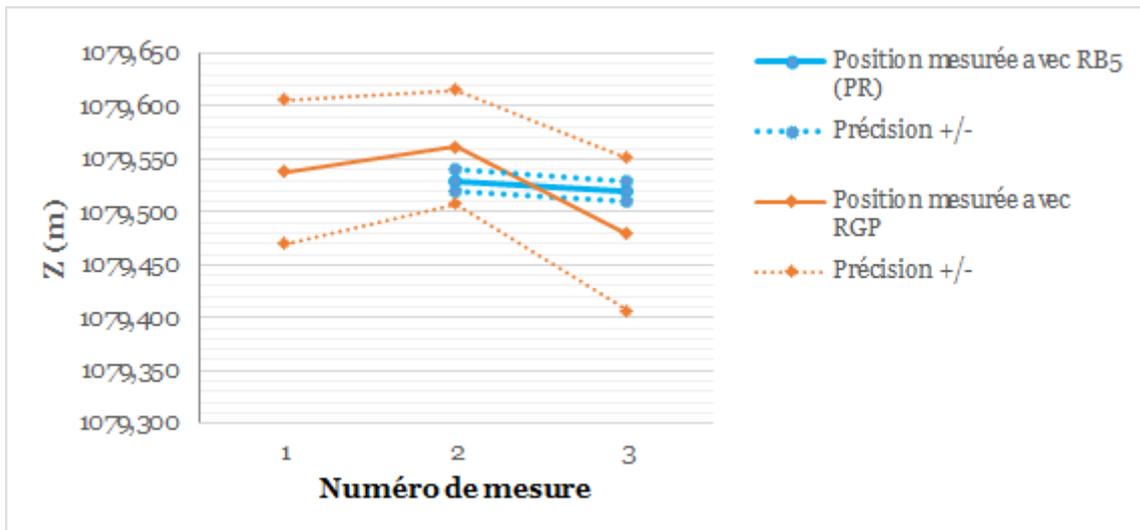


Figure A1.108. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB9 du réseau de détail n°2.

## Point RDB10 du réseau de détail n°2

Tableau A1.37. Coordonnées du point RDB10 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<i>Méthode de positionnement multistations RGP</i>						
1	09/01/2015	409008,111	6201881,043	1078,104	3,3	6,4
2	08/10/2015	409008,112	6201881,033	1078,122	3,8	5,5
3	20/05/2016	409008,155	6201880,992	1078,026	3,8	7,4
4	09/06/2016	409008,106	6201881,048	1078,127	2,8	6,3
<i>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR</i>						
2	08/10/2015	409008,126	6201881,027	1078,109	1,0	1,0
3	20/05/2016	409008,129	6201881,010	1078,098	1,0	1,0
4	09/06/2016	409008,103	6201881,036	1078,118	1,0	1,0

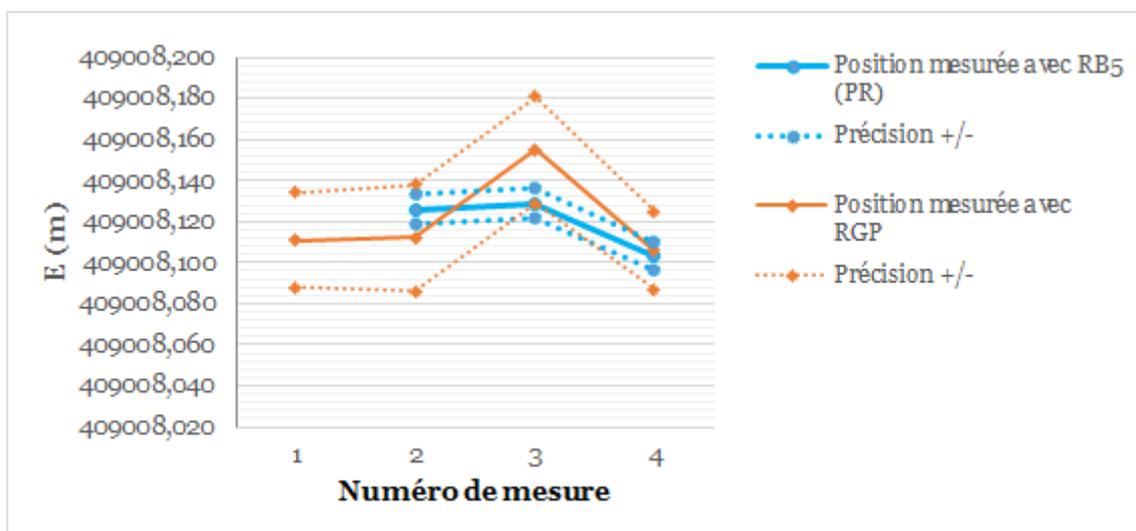


Figure A1.109. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB10 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

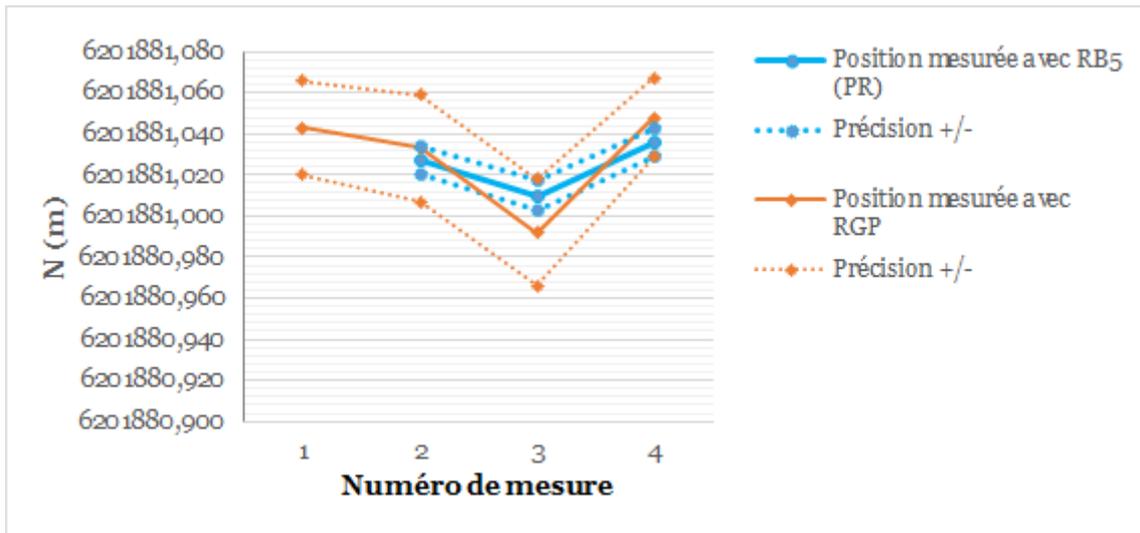


Figure A1.110. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB10 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

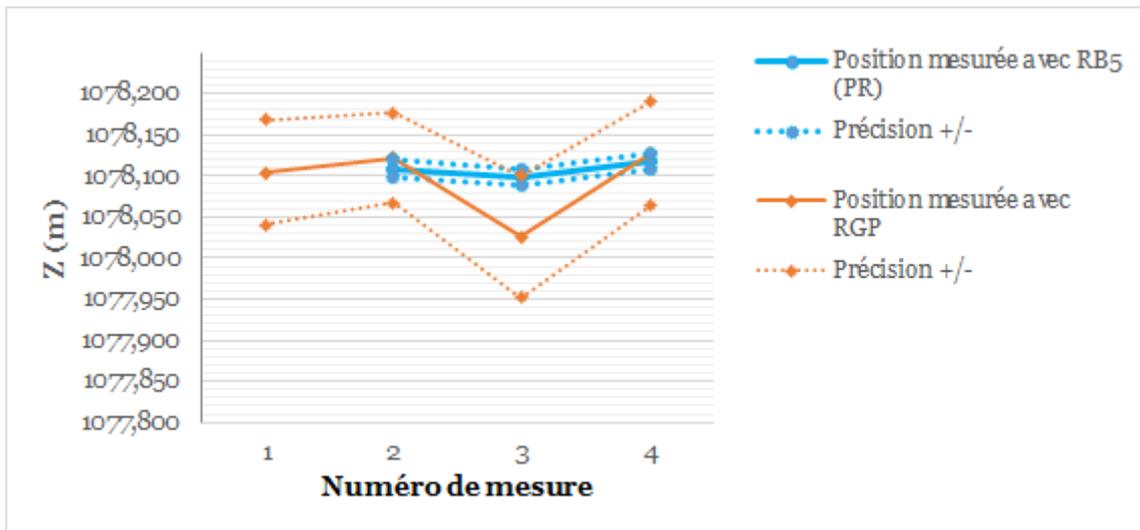


Figure A1.111. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB10 du réseau de détail n°2.

## Point RDB11 du réseau de détail n°2

Tableau A1.38. Coordonnées du point RDB11 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<i>Méthode de positionnement multistations RGP</i>						
1	09/01/2015	409105,136	6201884,174	1043,326	3,5	6,5
2	08/10/2015	409105,167	6201884,182	1043,373	2,9	5,2
3	20/05/2016	409105,168	6201884,190	1043,337	4,9	4,9
4	09/06/2016	409105,145	6201884,164	1043,344	2,9	4,8
<i>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR</i>						
2	08/10/2015	409105,149	6201884,174	1043,329	1,0	1,0
3	20/05/2016	409105,152	6201884,184	1043,326	1,0	1,0
4	09/06/2016	409105,135	6201884,164	1043,326	1,0	1,0

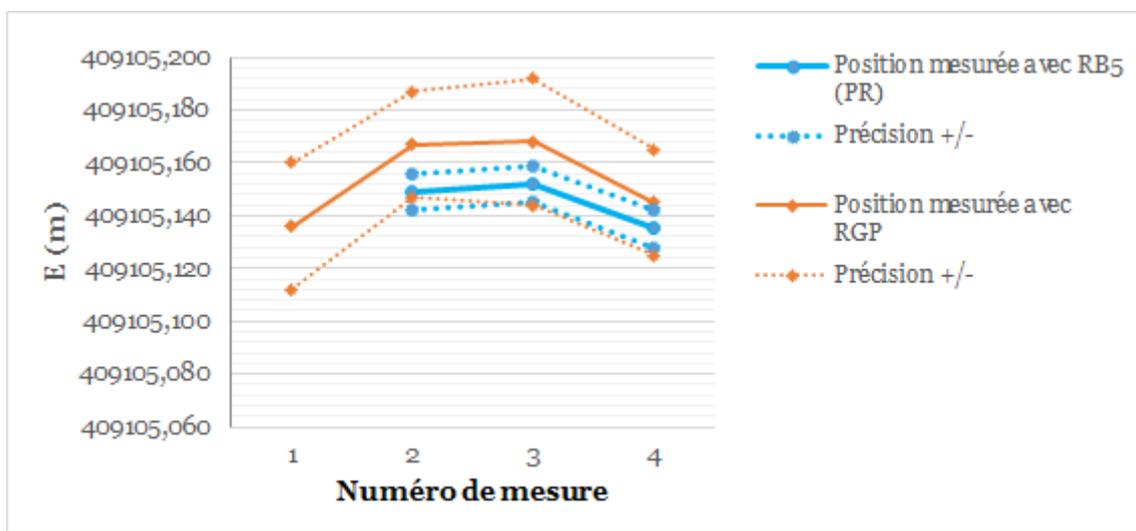


Figure A1.112. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB11 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

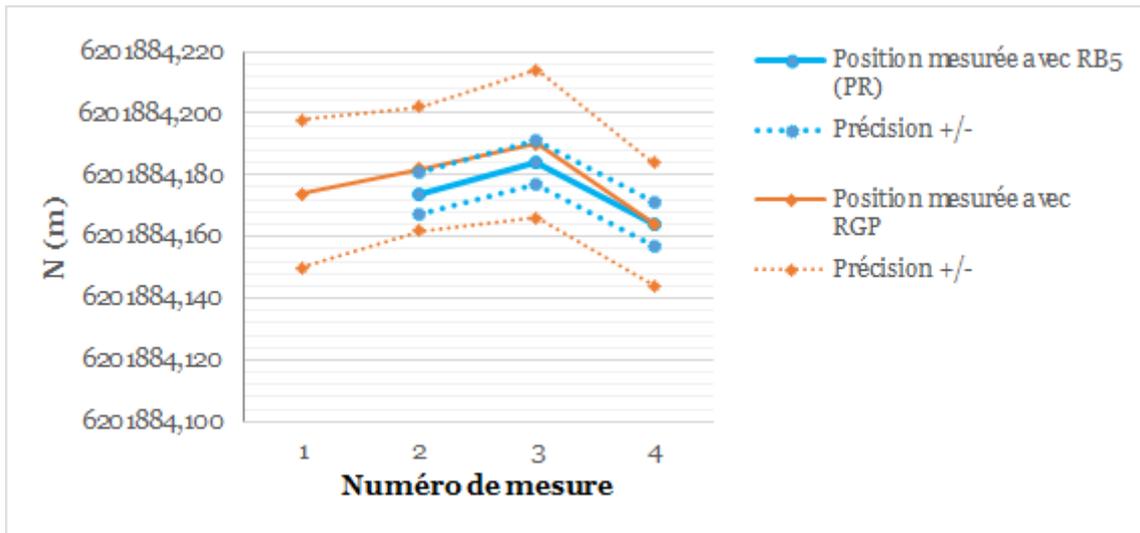


Figure A1.113. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB11 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

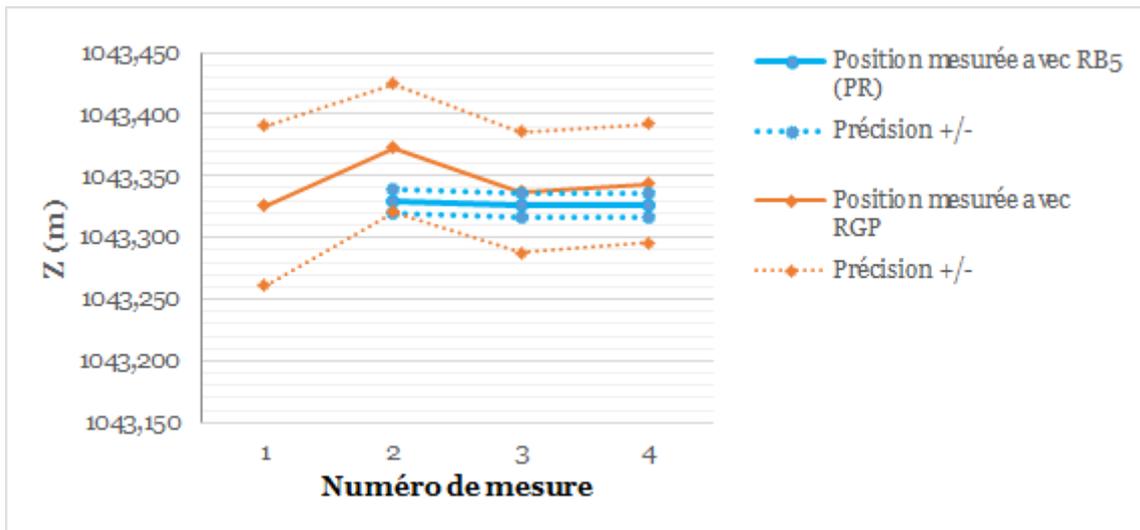


Figure A1.114. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB11 du réseau de détail n°2.

## Point RDB12 du réseau de détail n°2

Tableau A1.39. Coordonnées du point RDB12 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<i>Méthode de positionnement multistations RGP</i>						
1	09/01/2015	409123,823	6202068,716	1017,234	3,4	5,6
2	08/10/2015	409123,846	6202068,684	1017,257	4,5	6,1
3	20/05/2016	409123,822	6202068,694	1017,219	3,8	5,7
4	09/06/2016	409123,821	6202068,712	1017,253	3,4	5,6
<i>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR</i>						
2	08/10/2015	409123,830	6202068,701	1017,231	1,0	1,0
3	20/05/2016	409123,821	6202068,710	1017,224	1,0	1,0
4	09/06/2016	409123,815	6202068,716	1017,228	1,0	1,0

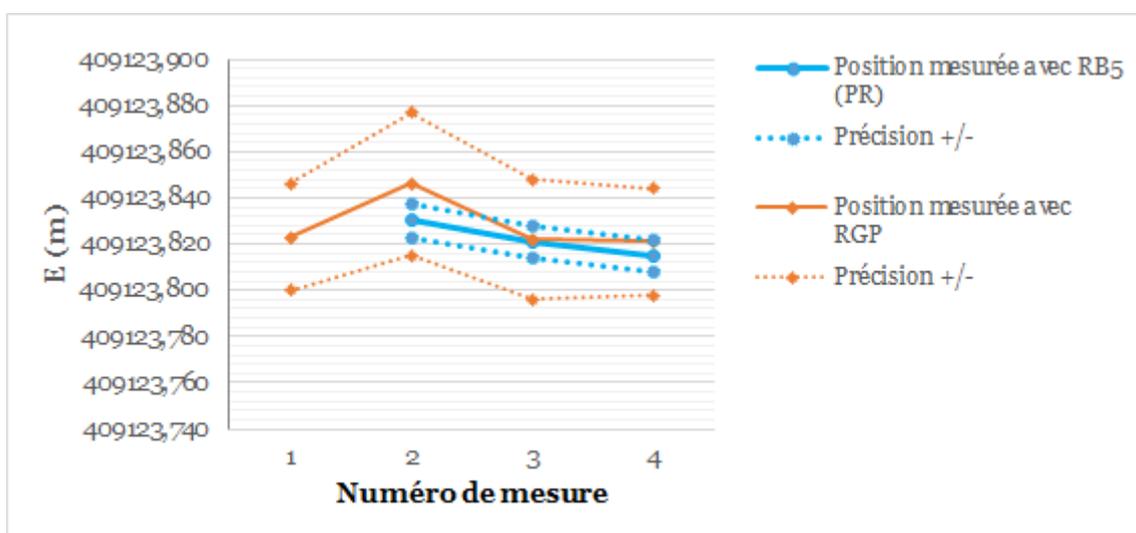


Figure A1.115. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB12 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

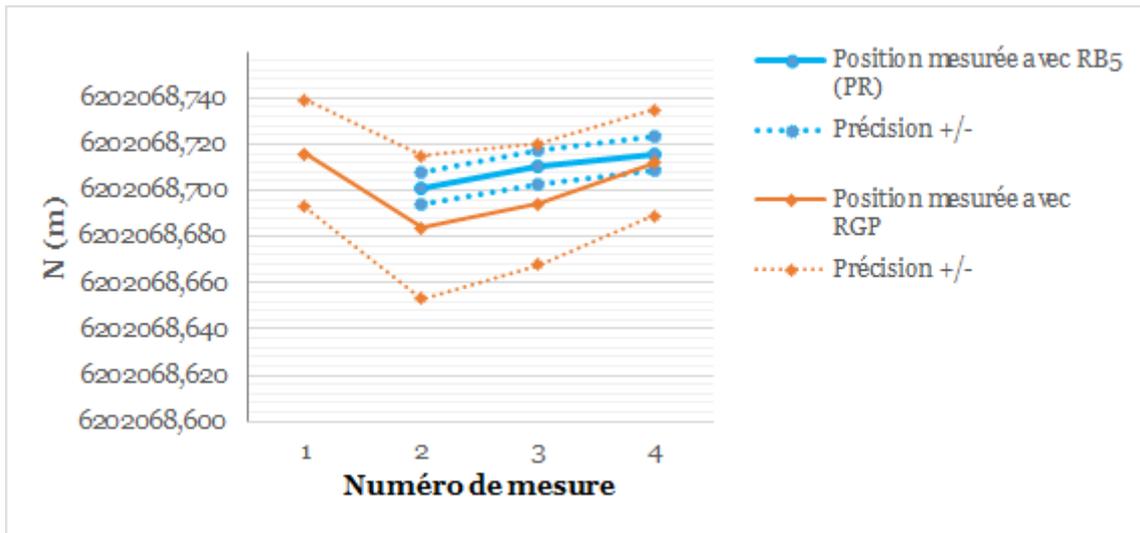


Figure A1.116. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB12 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

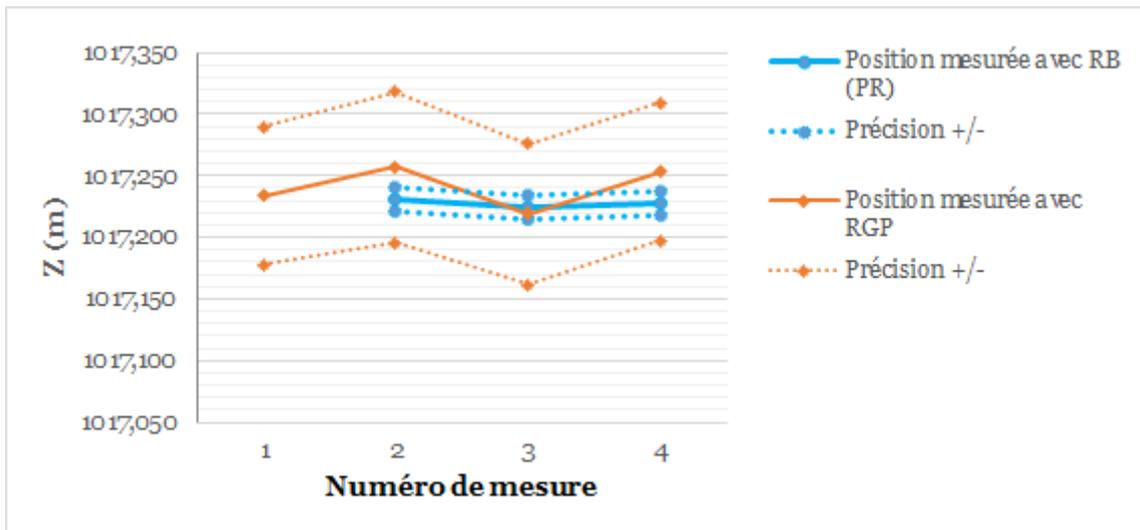


Figure A1.117. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB12 du réseau de détail n°2.

## Point RDB13 du réseau de détail n°2

Tableau A1.40. Coordonnées du point RDB13 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<i>Méthode de positionnement multistations RGP</i>						
1	08/10/2015	409193,002	6202104,705	981,236	7,5	12,4
2	20/05/2016	409193,038	6202104,673	981,234	9,7	12,8
3	09/06/2016	409193,117	6202104,647	981,289	10,0	18,5
<i>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR</i>						
1	08/10/2015	409193,032	6202104,722	981,359	1,0	1,7
2	20/05/2016	409193,049	6202104,716	981,351	1,3	2,1
3	09/06/2016	409193,063	6202104,703	981,361	1,3	2,1

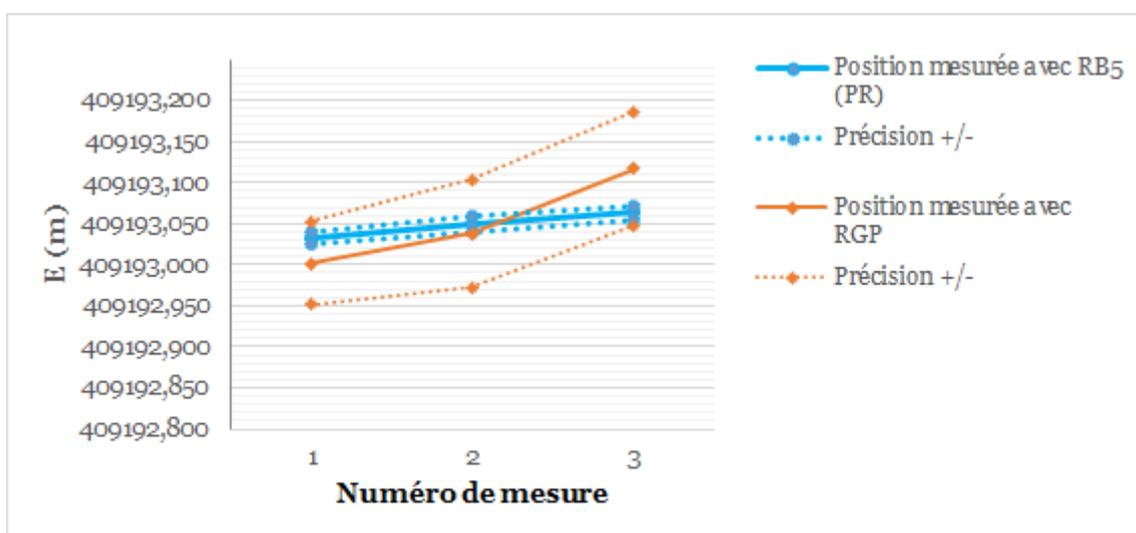


Figure A1.118. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB13 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

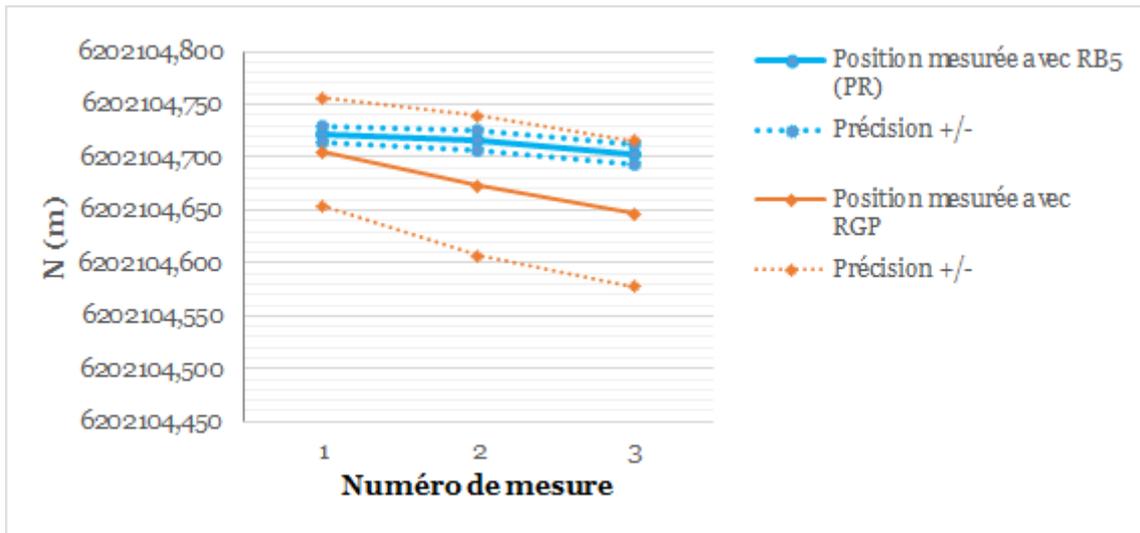


Figure A1.119. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB13 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

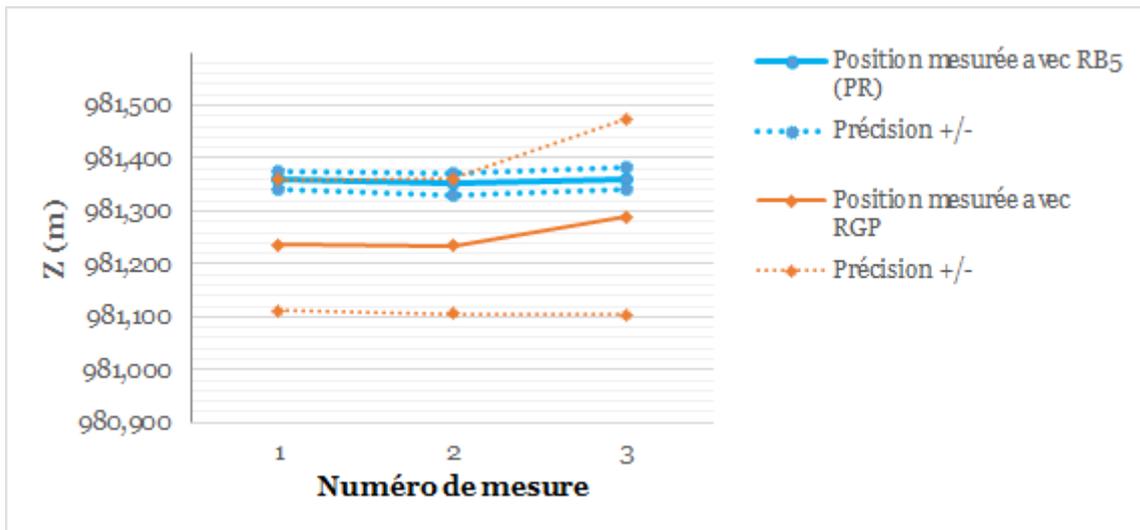


Figure A1.120. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB13 du réseau de détail n°2.

## Point RDB14 du réseau de détail n°2

Tableau A1.41. Coordonnées du point RDB14 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<u>Méthode de positionnement multistations RGP</u>						
1	08/10/2015	409291,253	6201952,884	943,725	10,0	17,6
2	20/05/2016	409291,249	6201952,846	943,698	4,2	7,7
3	09/06/2016	409291,189	6201952,897	943,676	5,6	11,9
<u>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR</u>						
1	08/10/2015	409291,240	6201952,881	943,724	1,0	1,7
2	20/05/2016	409291,231	6201952,870	943,712	1,0	1,7
3	09/06/2016	409291,225	6201952,886	943,702	1,0	1,7

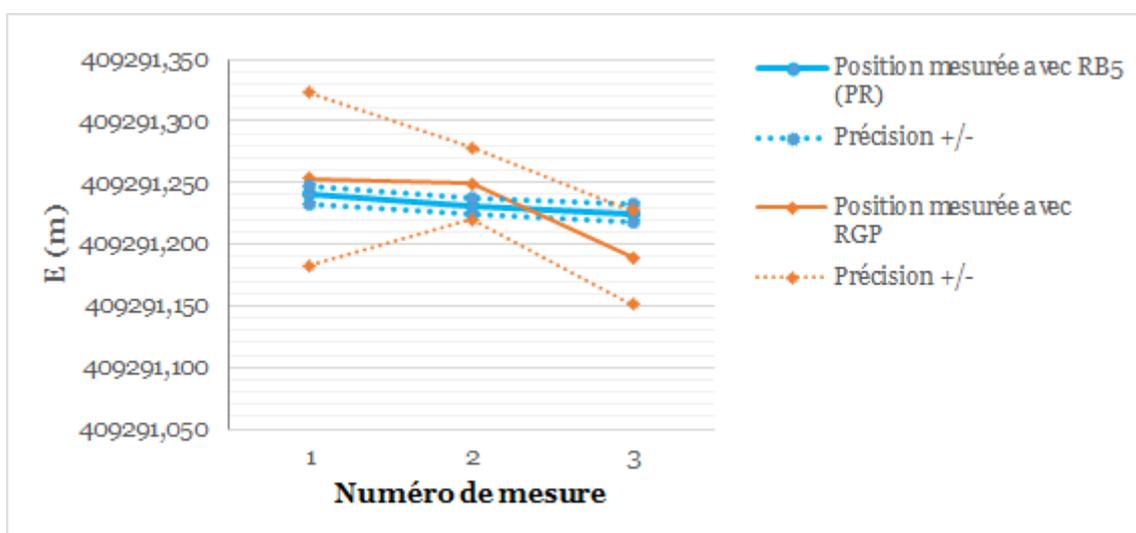


Figure A1.121. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB14 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

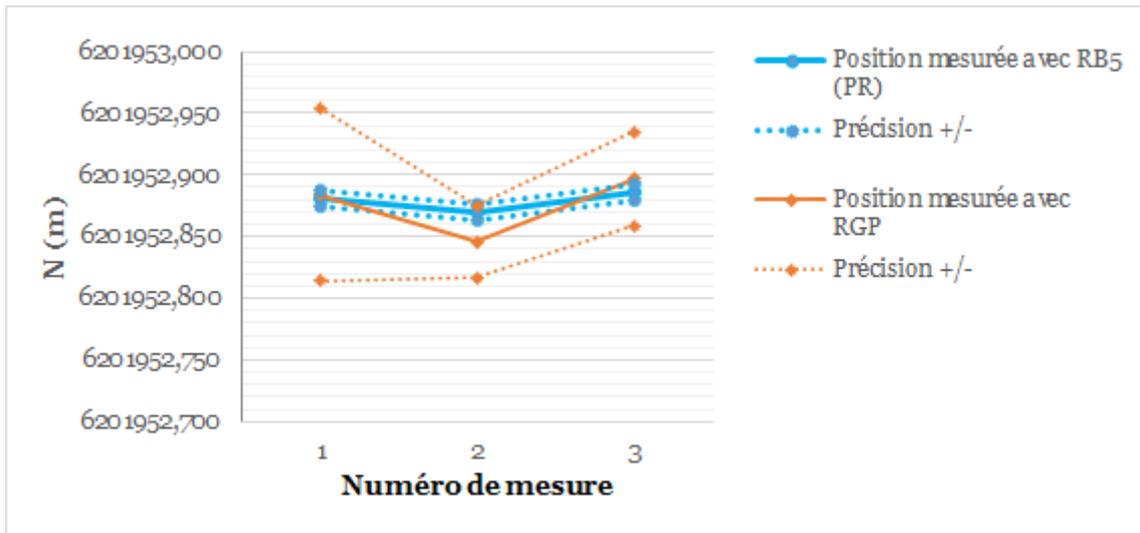


Figure A1.122. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB14 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

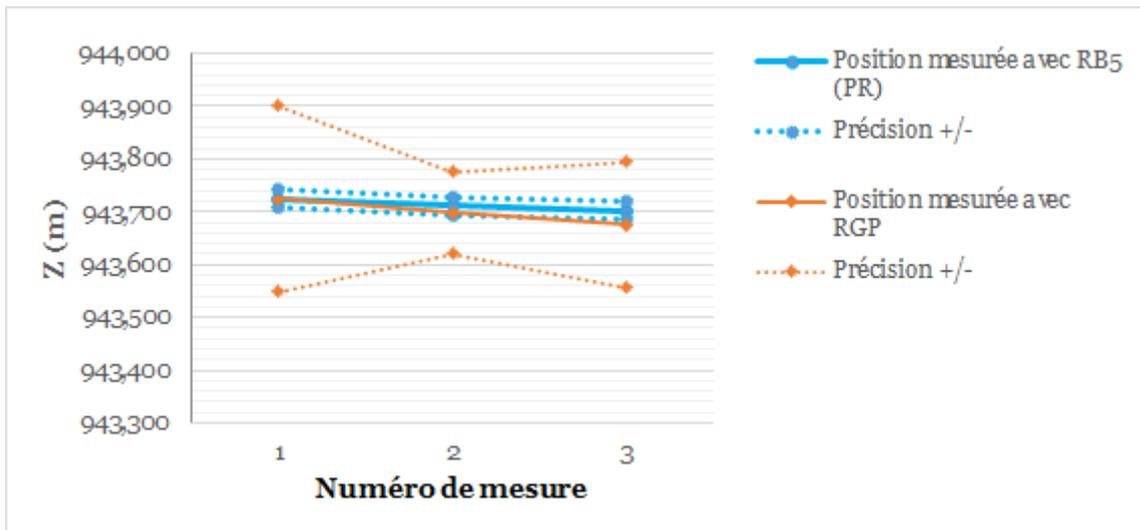


Figure A1.123. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB14 du réseau de détail n°2.

## Point RDB15 du réseau de détail n°2

Tableau A1.42. Coordonnées du point RDB15 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<u>Méthode de positionnement multistations RGP</u>						
1	08/10/2015	409351,652	6201888,740	919,017	2,8	5,8
2	20/05/2016	409351,671	6201888,699	918,996	4,2	10,2
3	09/06/2016	409351,593	6201888,733	919,124	3,8	5,9
<u>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR</u>						
1	08/10/2015	409351,635	6201888,729	919,051	1,0	1,3
2	20/05/2016	409351,641	6201888,723	919,049	1,0	1,8
3	09/06/2016	409351,615	6201888,729	919,069	1,0	1,8

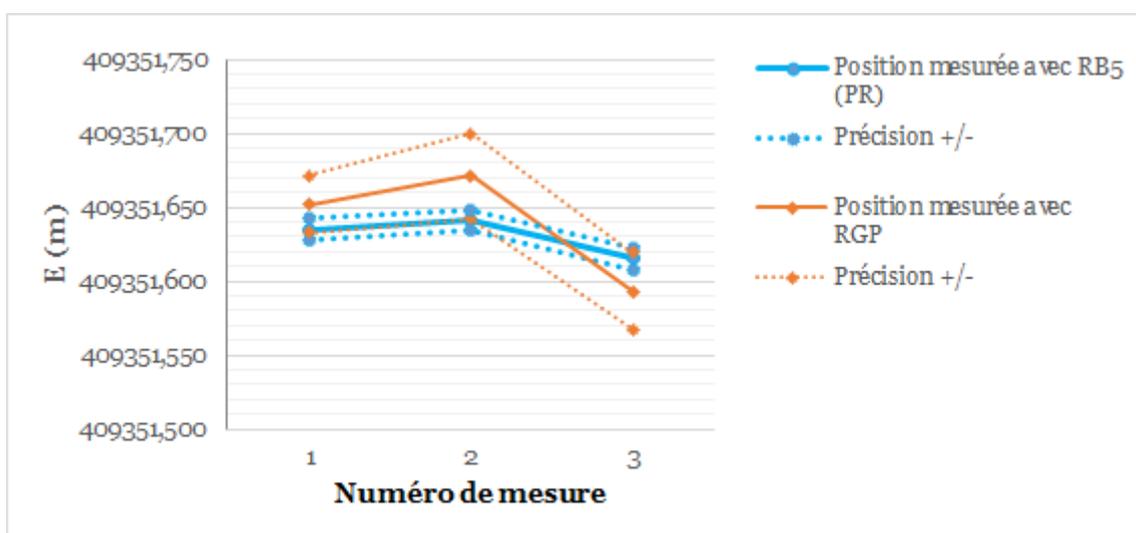


Figure A1.124. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB15 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

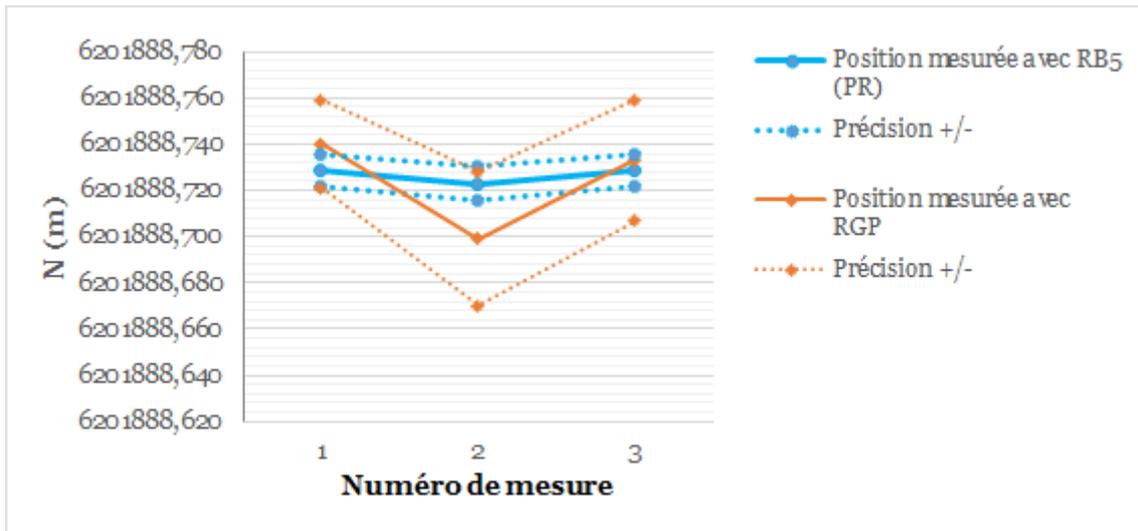


Figure A1.125. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB15 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

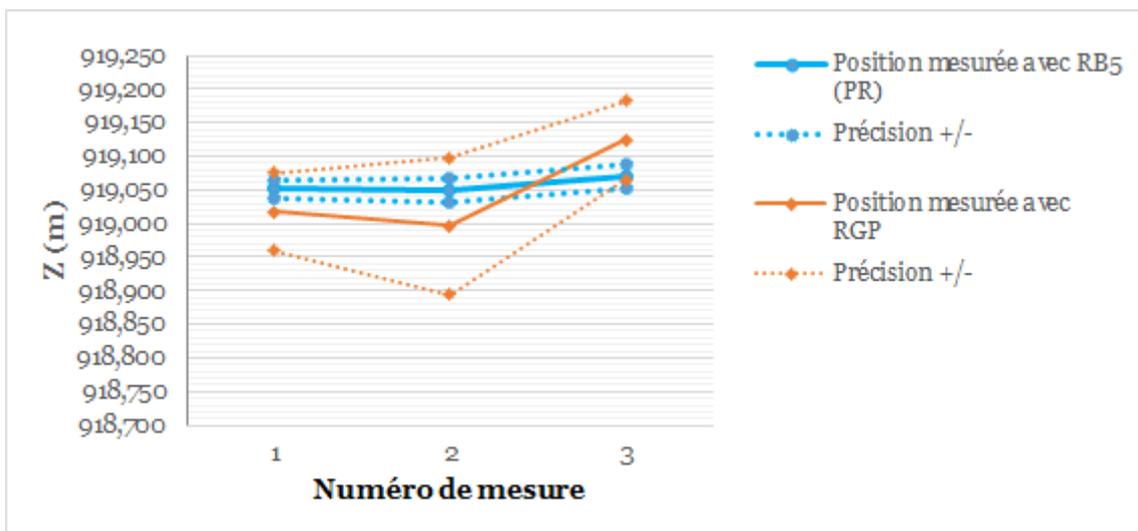


Figure A1.126. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB15 du réseau de détail n°2.

## Point RDB16 du réseau de détail n°2

Tableau A1.43. Coordonnées du point RDB16 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<i>Méthode de positionnement multistations RGP</i>						
1	08/10/2015	409338,068	6201773,769	906,121	3,0	5,3
2	20/05/2016	409338,052	6201773,739	906,072	3,5	8,6
3	09/06/2016	409338,064	6201773,788	906,135	3,9	5,0
<i>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR</i>						
1	08/10/2015	409338,054	6201773,763	906,134	1,0	1,1
2	20/05/2016	409338,049	6201773,759	906,126	1,0	1,4
3	09/06/2016	409338,053	6201773,775	906,136	1,0	1,4

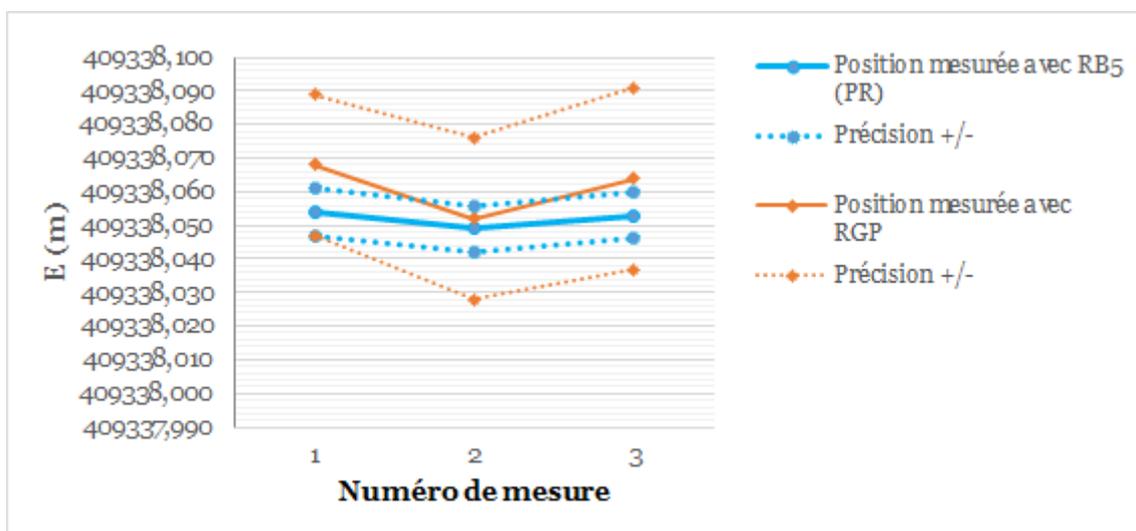


Figure A1.127. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB16 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

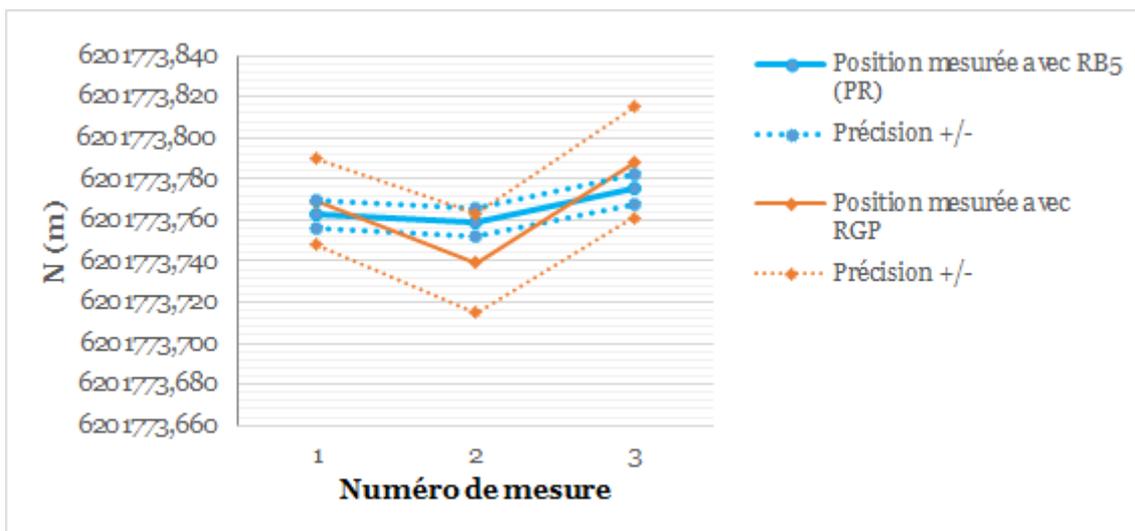


Figure A1.128. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB16 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

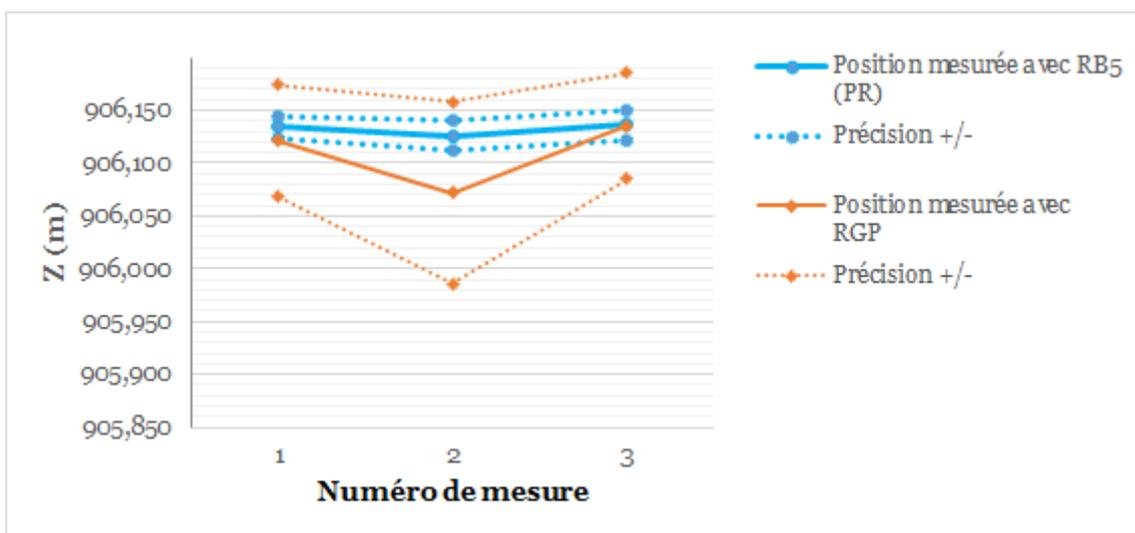


Figure A1.129. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB16 du réseau de détail n°2.

## Point RDB17 du réseau de détail n°2

Tableau A1.44. Coordonnées du point RDB17 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<i>Méthode de positionnement multistations RGP</i>						
1	08/10/2015	409350,656	6201730,993	899,930	3,1	5,3
2	20/05/2016	409350,661	6201730,983	899,912	3,2	8,4
3	09/06/2016	409350,643	6201731,024	899,950	3,8	4,9
<i>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR</i>						
1	08/10/2015	409350,647	6201731,009	899,962	1,0	1,1
2	20/05/2016	409350,651	6201730,997	899,960	1,0	1,3
3	09/06/2016	409350,645	6201731,013	899,962	1,0	1,3

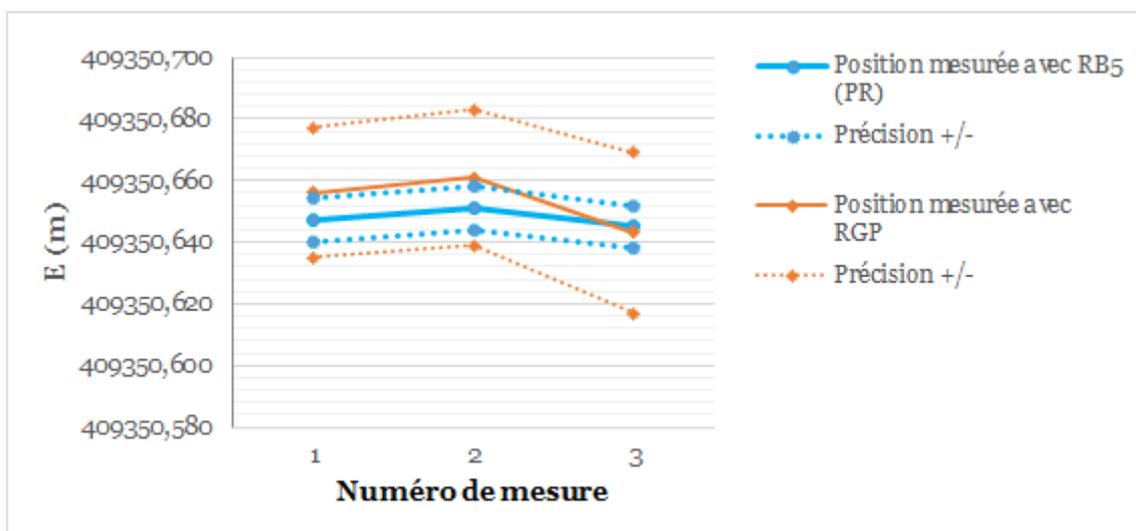


Figure A1.130. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB17 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

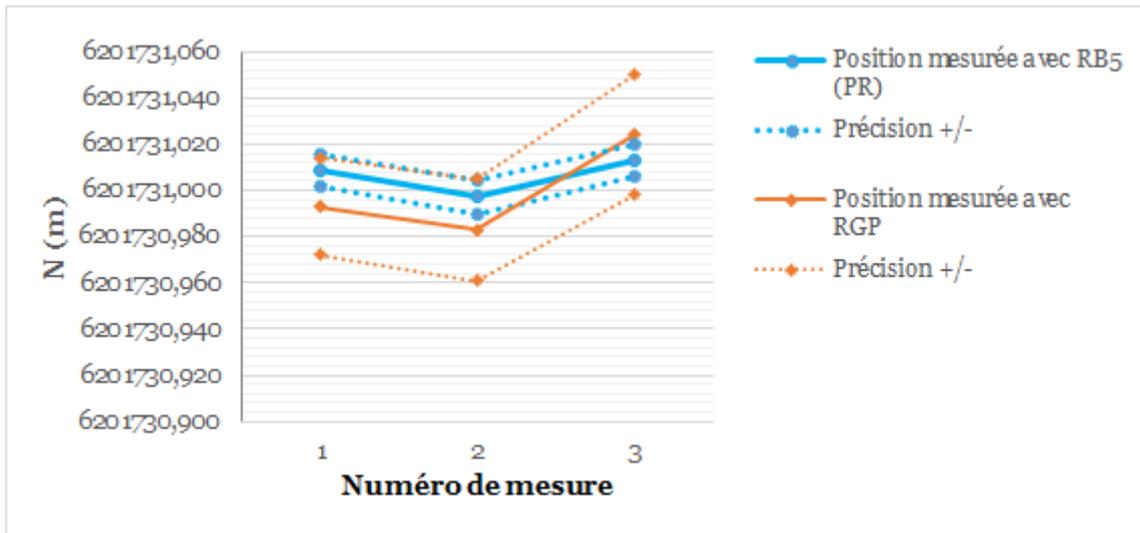


Figure A1.131. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB17 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

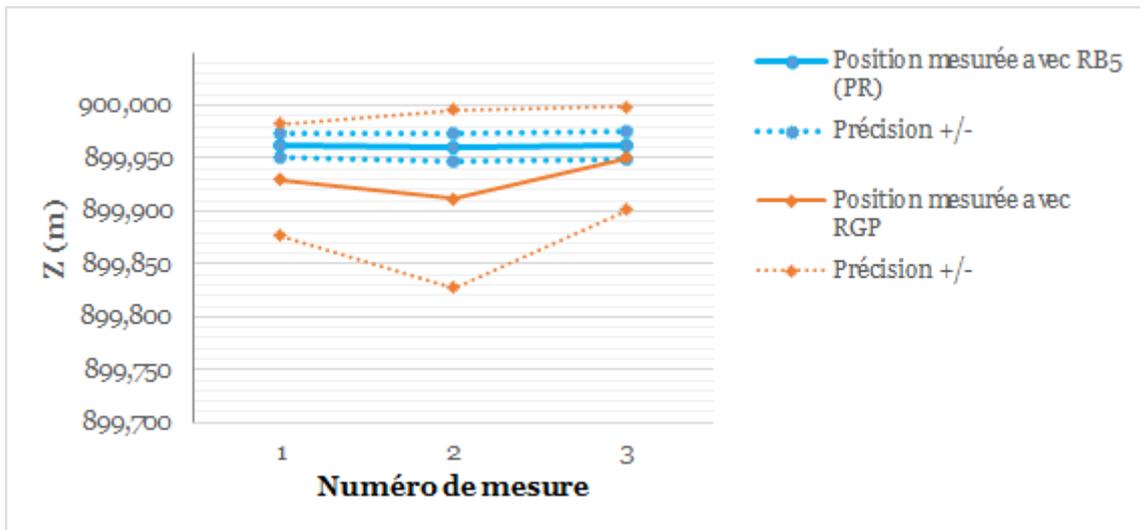


Figure A1.132. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB17 du réseau de détail n°2.

## Point RDB18 du réseau de détail n°2

Tableau A1.45. Coordonnées du point RDB18 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<u>Méthode de positionnement multistations RGP</u>						
1	08/10/2015	409353,283	6201682,752	893,224	3,0	5,5
2	20/05/2016	409353,301	6201682,740	893,172	2,9	7,9
3	09/06/2016	409353,215	6201682,738	893,226	5,1	7,0
<u>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR</u>						
1	08/10/2015	409353,275	6201682,766	893,221	1,0	1,1
2	20/05/2016	409353,285	6201682,761	893,212	1,0	1,3
3	09/06/2016	409353,249	6201682,757	893,222	1,0	1,3

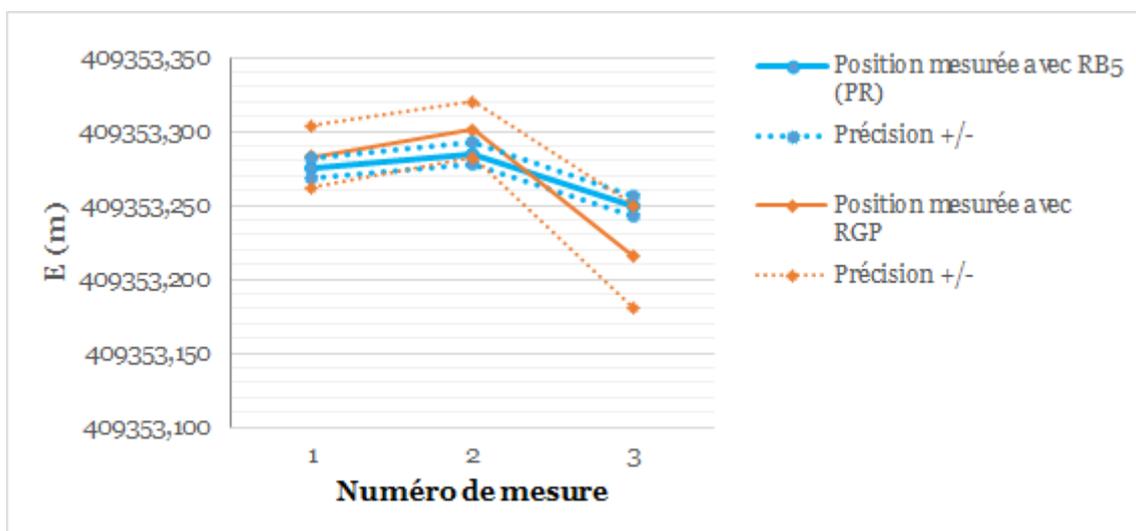


Figure A1.133. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB18 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

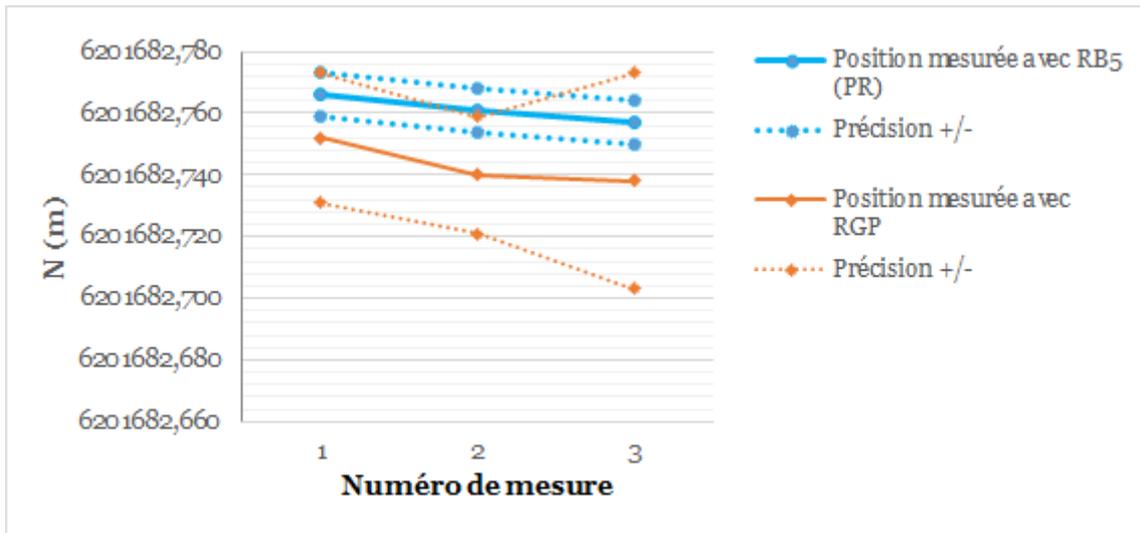


Figure A1.134. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB18 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

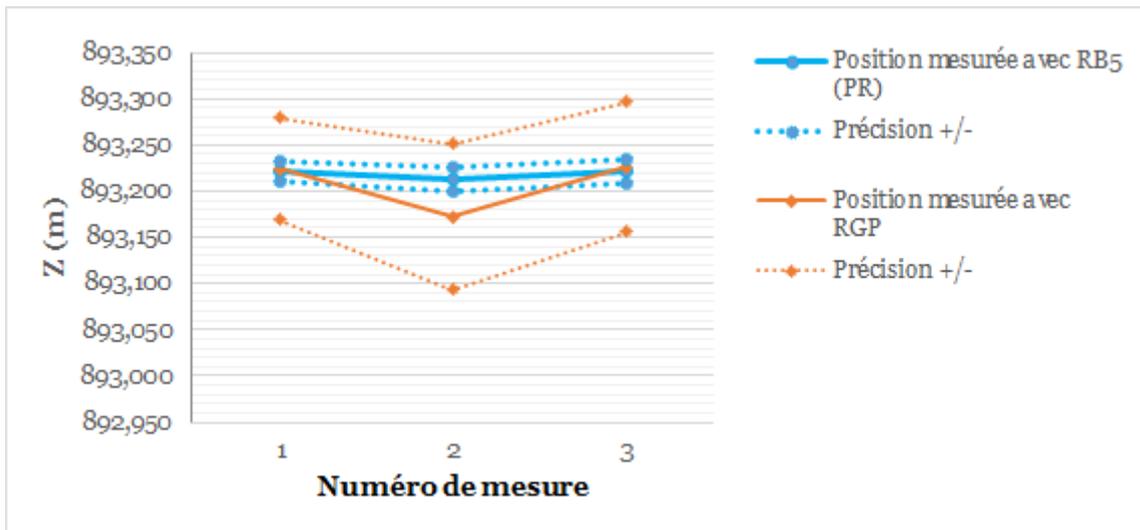


Figure A1.135. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB18 du réseau de détail n°2.

## Point RDB19 du réseau de détail n°2

Tableau A1.46. Coordonnées du point RDB19 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<u>Méthode de positionnement multistations RGP</u>						
1	08/10/2015	409450,588	6201597,656	882,536	2,9	4,9
2	20/05/2016	409450,616	6201597,658	882,449	3,0	8,0
3	09/06/2016	409450,534	6201597,627	882,510	4,3	7,3
<u>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR</u>						
1	08/10/2015	409450,581	6201597,659	882,530	1,0	1,0
2	20/05/2016	409450,593	6201597,660	882,515	1,0	1,3
3	09/06/2016	409450,560	6201597,656	882,518	1,0	1,3

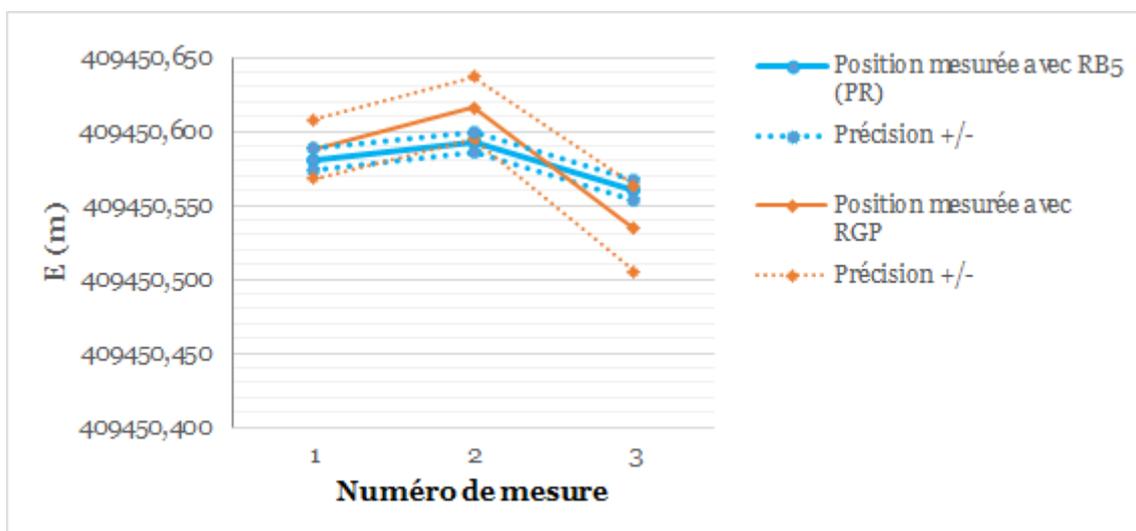


Figure A1.136. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB19 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

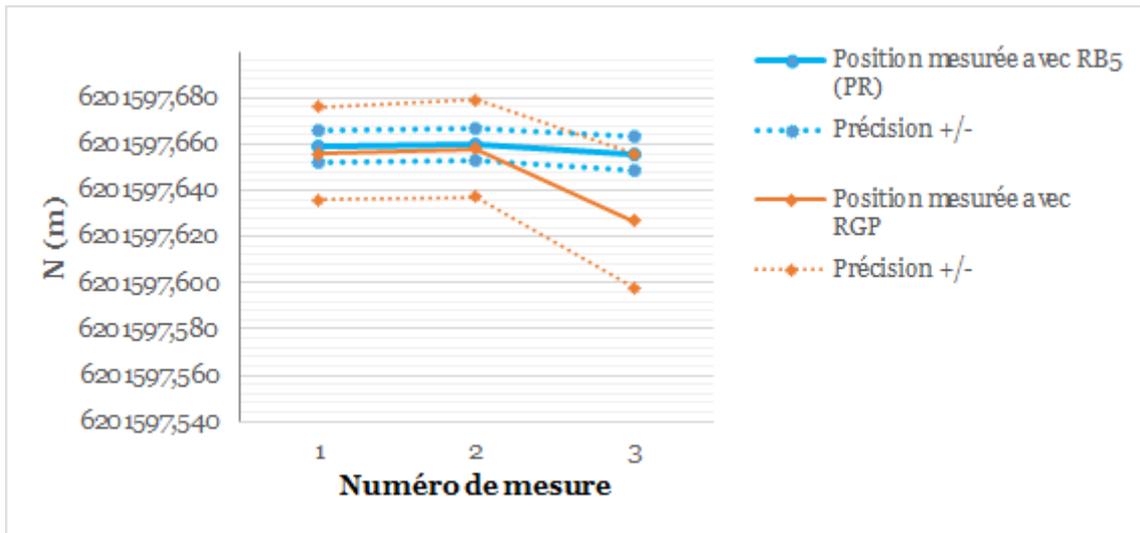


Figure A1.137. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB19 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

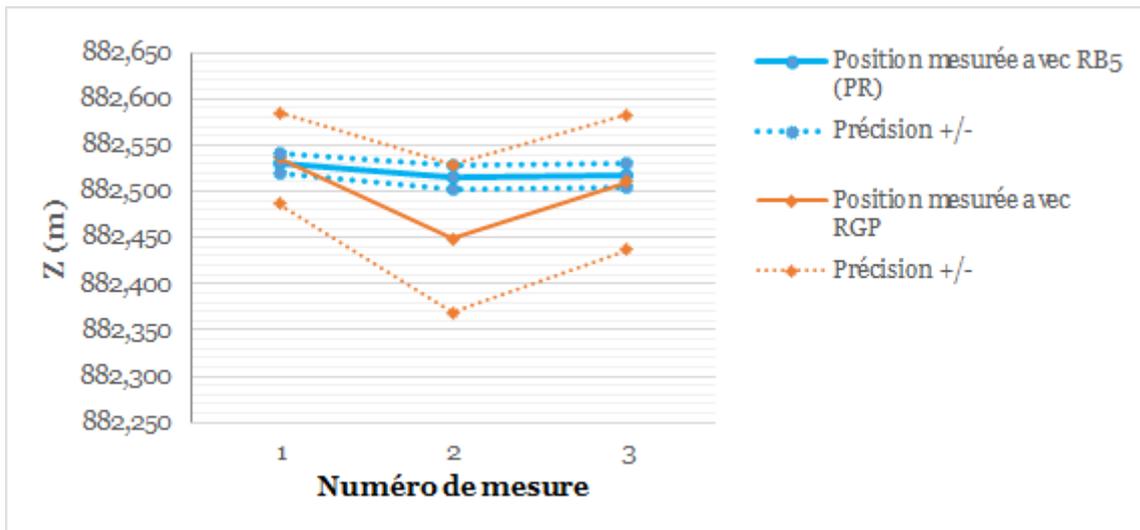


Figure A1.138. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB19 du réseau de détail n°2.

## Point RDB20 du réseau de détail n°2

Tableau A1.47. Coordonnées du point RDB20 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<i>Méthode de positionnement multistations RGP</i>						
1	08/10/2015	409471,323	6201589,632	879,683	3,0	4,5
2	20/05/2016	409471,325	6201589,614	879,612	2,7	5,3
3	09/06/2016	409471,269	6201589,602	879,639	4,1	7,5
<i>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR</i>						
1	08/10/2015	409471,315	6201589,633	879,654	1,0	1,1
2	20/05/2016	409471,324	6201589,618	879,639	1,0	1,2
3	09/06/2016	409471,288	6201589,614	879,649	1,0	1,2

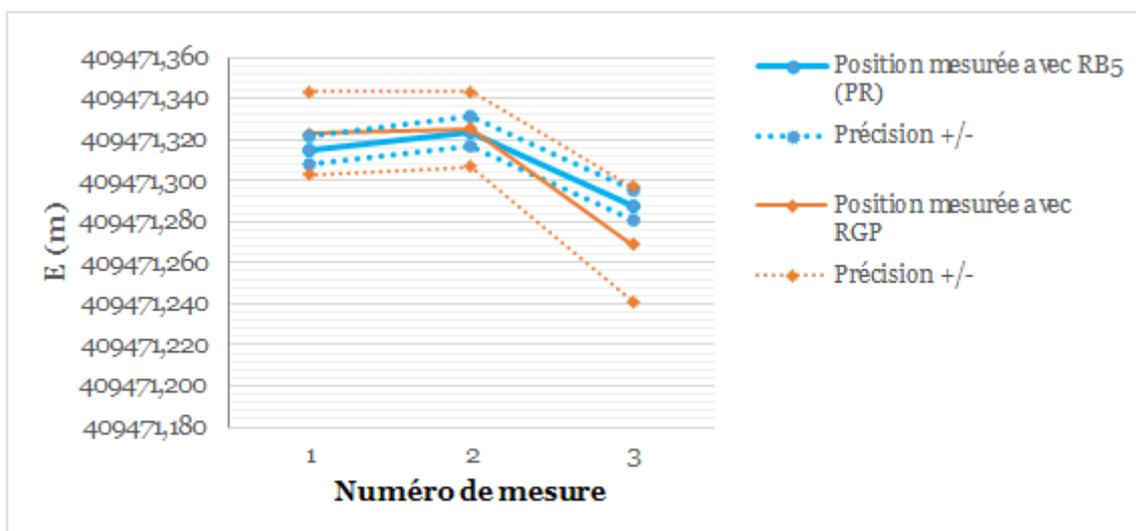


Figure A1.139. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB20 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

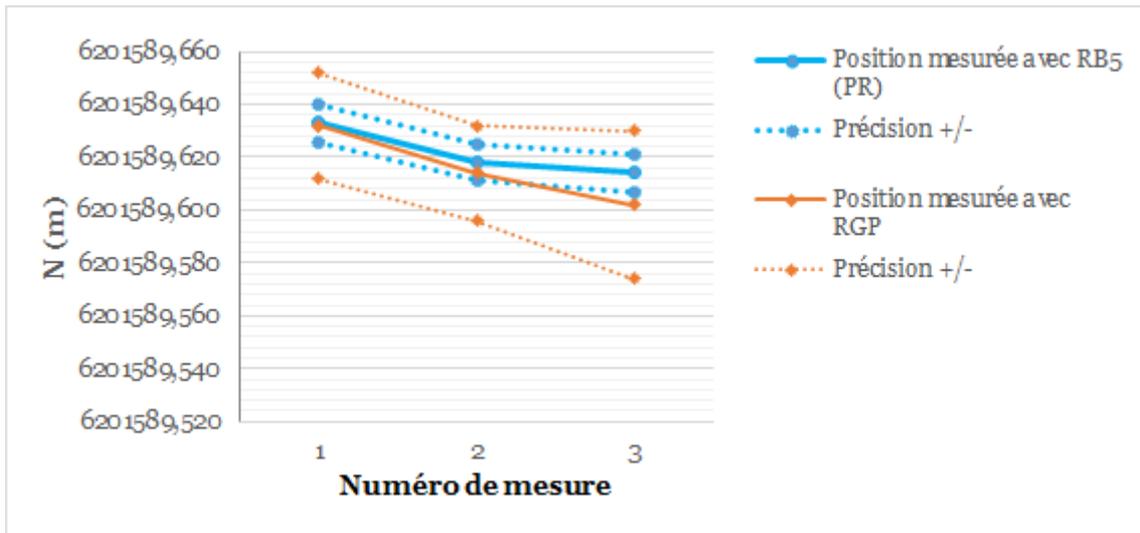


Figure A1.140. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB20 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

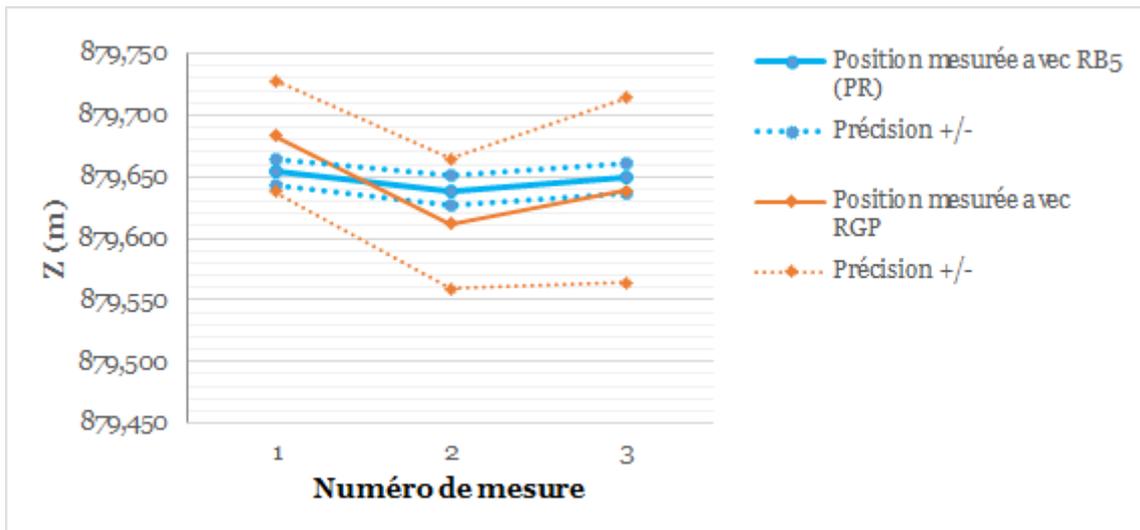


Figure A1.141. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB20 du réseau de détail n°2.

## Point RDB21 du réseau de détail n°2

Tableau A1.48. Coordonnées du point RDB21 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<i>Méthode de positionnement multistations RGP</i>						
1	08/10/2015	409511,804	6201570,147	877,733	3,0	4,4
2	20/05/2016	409511,783	6201570,134	877,707	2,8	5,9
3	09/06/2016	409511,762	6201570,163	877,724	4,5	7,1
<i>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR</i>						
1	08/10/2015	409511,792	6201570,150	877,749	1,0	1,0
2	20/05/2016	409511,782	6201570,144	877,748	1,0	1,4
3	09/06/2016	409511,781	6201570,160	877,748	1,0	1,4

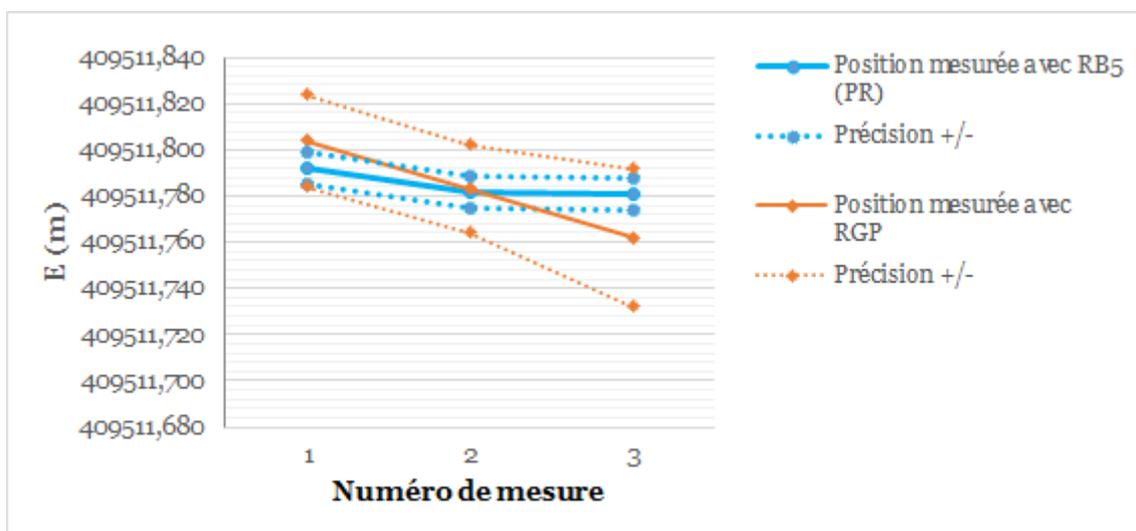


Figure A1.142. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB21 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

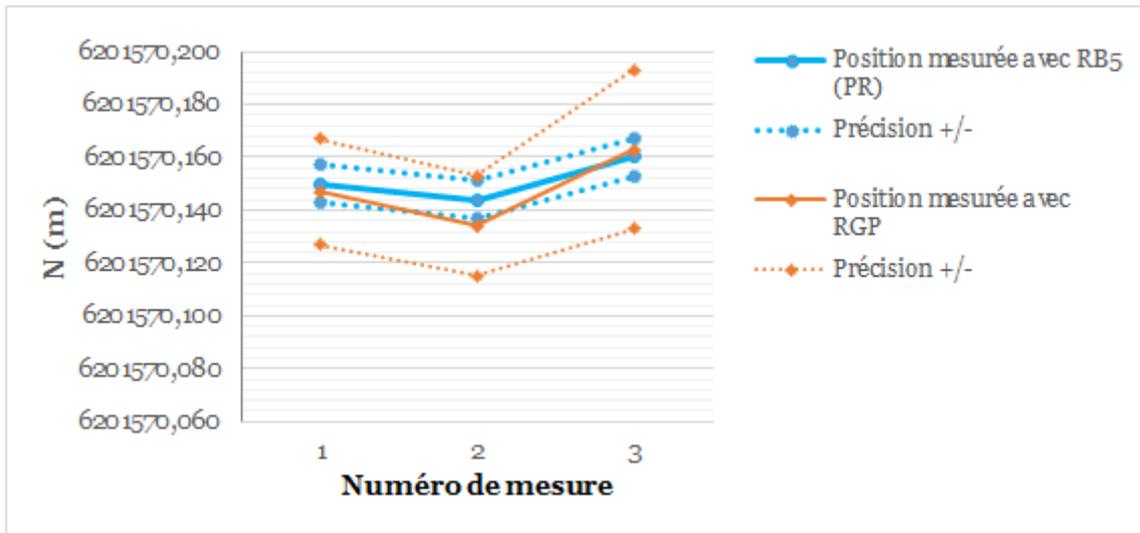


Figure A1.143. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB21 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

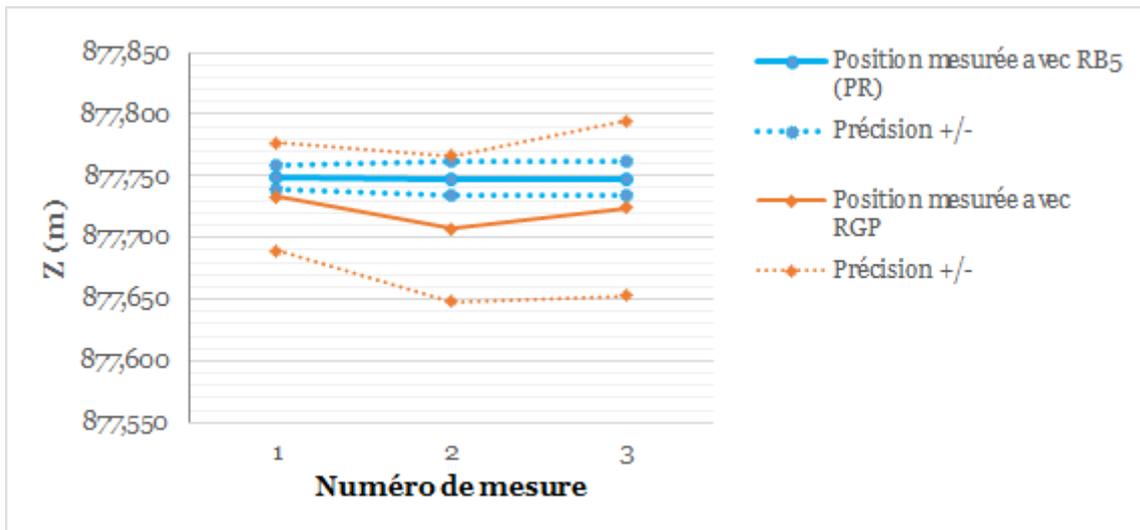


Figure A1.144. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB21 du réseau de détail n°2.

## Point RDB22 du réseau de détail n°2

Tableau A1.49. Coordonnées du point RDB22 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.

Numéro	Date	E (m)	N (m)	Z (m)	dH (cm)	dV (cm)
<u>Méthode de positionnement multistations RGP</u>						
1	08/10/2015	409460,761	6201317,169	882,620	4,9	8,9
2	20/05/2016	409460,834	6201317,116	882,629	6,6	11,2
3	09/06/2016	409460,726	6201317,111	882,639	8,7	20,2
<u>Méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR</u>						
1	08/10/2015	409460,783	6201317,163	882,621	1,0	1,3
2	20/05/2016	409460,810	6201317,159	882,630	1,2	2,0
3	09/06/2016	409460,779	6201317,153	882,641	1,3	3,0

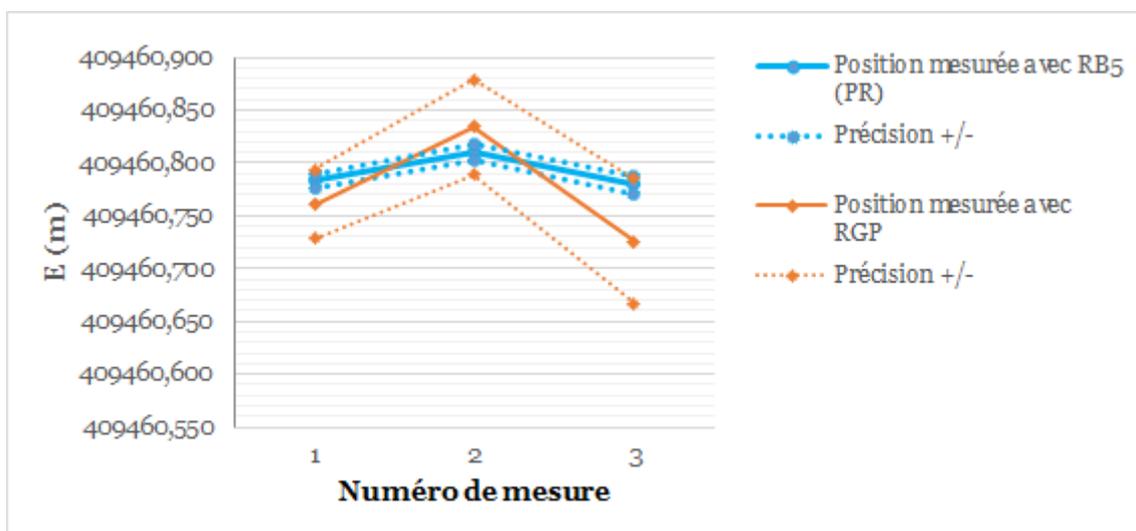


Figure A1.145. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB22 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

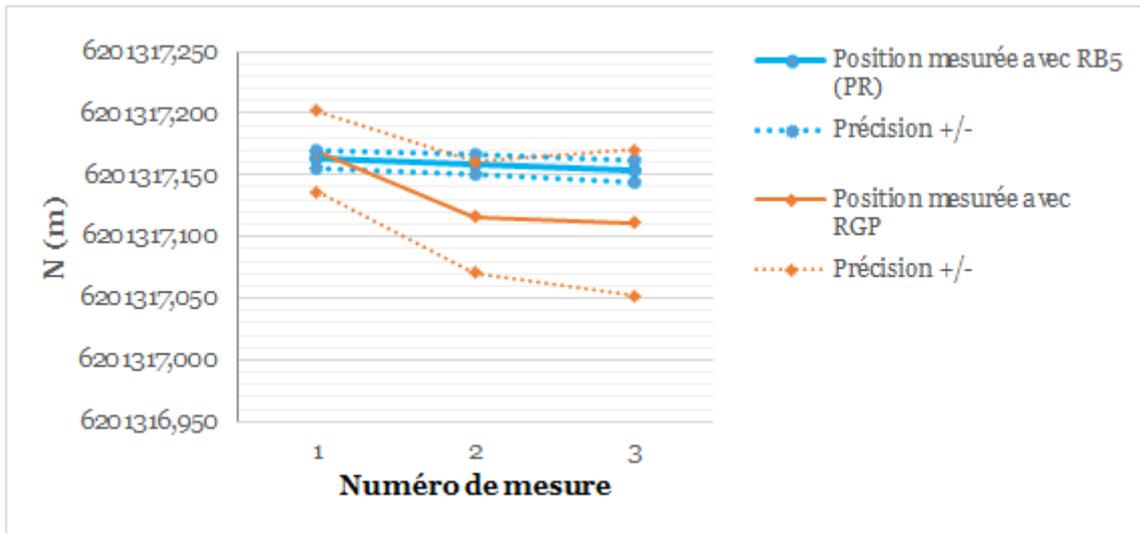


Figure A1.146. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB22 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.

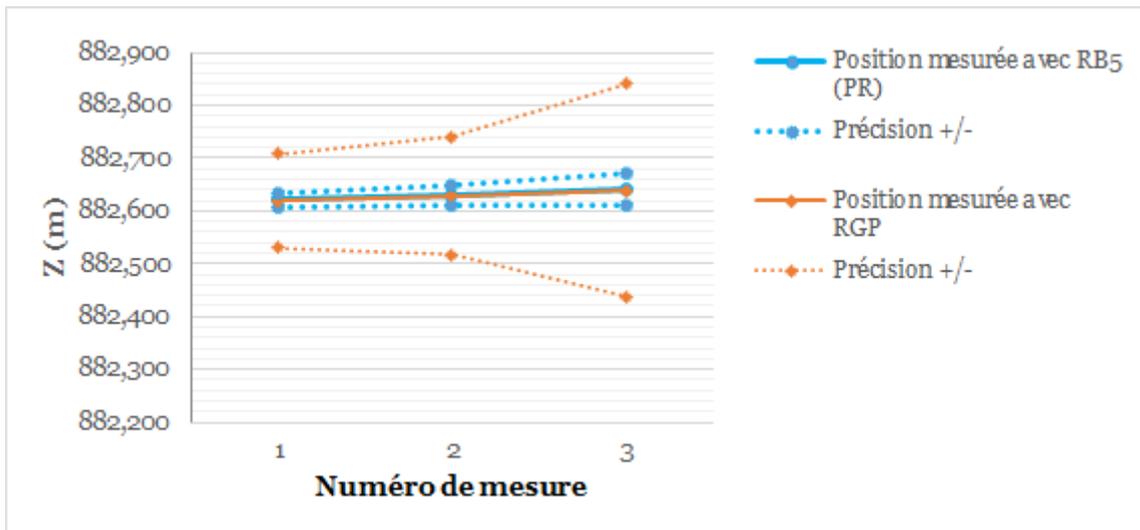


Figure A1.147. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB22 du réseau de détail n°2.

## LISTE DES FIGURES

Figure II.1. Évolution de la production scientifique entre les années 1970 et 2015 en fonction du nombre de documents contenant les mots-clefs [a] « Landslides », [b] « Deep-Seated Landslide » (DSL) et [c] « Deep-Seated Gravitational Slope Deformation » (DSGSD). Illustration réalisée à partir d’une recherche par mots-clefs effectuée avec la base de données de Scopus ( <a href="https://www.elsevier.com/solutions/scopus">https://www.elsevier.com/solutions/scopus</a> , dernière consultation en juillet 2016). Cf. Choix de la base de données et des critères pour le choix des domaines thématiques et des indicateurs bibliométriques. ....	23
Figure II.2. Classement des sept premiers pays contributeurs pour la période 1970-2015 en fonction du nombre de documents contenant les mots-clefs [a] « Landslide », [b] « Deep-Seated Landslide » (DSL) et [c] « Deep-Seated Gravitational Slope Deformation » (DSGSD). Illustration réalisée à partir d’une recherche par mots-clefs effectuée avec la base de données de Scopus ( <a href="https://www.elsevier.com/solutions/scopus">https://www.elsevier.com/solutions/scopus</a> , dernière consultation en juillet 2016). Cf. Choix de la base de données et des critères pour le choix des domaines thématiques et des indicateurs bibliométriques. ....	27
Figure II.3. Classification simplifiée de Varnes (1978 ; traduite) avec les représentations schématiques des types de mouvement (dessinées par Cruden & Varnes, 1996 in Hungr et al., 2014).....	31
Figure II.4. Stades de déformation d’un DSGSD dans les Carpates Slovaques d’après Nemčok (1977, 1982) in Hungr et al. (2014) : [a] stades de déformation initiaux et [b] stades de déformation avancés. ....	35
Figure II.5. Répartition des instabilités gravitaires de grandes ampleurs du type DSGSD d’après Pánek & Klimeš (2016 ; illustration traduite) : [a] contexte mondial et [b] vue détaillée de l’Europe. Les régions hachurées et numérotées contiennent d’importantes bases de données : [b-1] les Highlands écossaises (Jarman, 2006) ; [b-2] les Pyrénées orientales (Jarman et al., 2014) ; [b-3] les Alpes européennes (Crosta et al., 2013) ; [b-4] les Carpates occidentales (Alexandrowicz & Alexandrowicz, 1988). ....	36
Figure II.6. Conditions topographiques d’occurrences d’un mouvement de terrain catastrophique et d’un mouvement de terrain non catastrophique de type DSGSD dans les Alpes européennes d’après Agliardi et al. (2013 ; illustration traduite et simplifiée). ....	37

Figure II.7. Caractéristiques morphostructurales typiques d'un DSGSD d'après Agliardi et al. (2001, 2012 ; illustration traduite et modifiée) : [a] morphostructures primaires ; [b] morphostructures secondaires ; [c] associations de morphostructures possibles. .... 39

Figure II.8. Variété de déformations d'un versant instable proposée dans la littérature scientifique d'après Agliardi et al. (2012) : [a], [b], [c], [f] Bois et al. (2008) ; [d] Mahr (1977) ; [e], [g], [h], [i] Ambrosi & Crosta (2006) ; [j] Agliardi et al. (2001) ; [k], [l] Hutchinson (1988) ; [m], [n] Zischinsky (1966) ; [o], [p], [t] Chigira (1992) ; [q], [r] Nemčok (1972a) ; [s] Agliardi et al. (2009a). ....41

Figure II.9. DSGSD type « sackung » d'après : [a] Agliardi et al. (2001) ; [b] Bisci et al. (1996) in Soldati (2013). .... 42

Figure II.10. DSGSD type « lateral spreading » d'après Pasuto & Soldati (1996) in Soldati (2013) : [a] cas d'un massif rocheux homogène ; [b] cas d'un massif rocheux fragile recouvrant une formation ductile. .... 43

Figure II.11. Approches effectuées par la communauté scientifique pour étudier une instabilité gravitaire de grande ampleur du type DSGSD et du type DSL. .... 45

Figure II.12. Situation du massif de la Cristallère en France [a] et en haute Vallée d'Aspe près de la frontière franco-espagnole (ortho-image 2012 de l'IGN récupérée sur <http://professionnels.ign.fr/> en mars 2016) [b]. .... 53

Figure II.13. Tracé schématique et partiel de l'ancienne galerie et de la nouvelle galerie de la centrale hydroélectrique du Baralet dans le secteur des fermes Lapédagne et Barringou en amont de Bérat du haut (EDF, 1949 ; annoté). .... 55

Figure II.14. Cumuls annuels de précipitations pour la période 1948-2010 relevés au niveau des sites suivants : le barrage du Peilhou (zone sud du massif de la Cristallère) et l'usine hydroélectrique du Baralet (zone nord du massif de la Cristallère). Les valeurs moyennes annuelles de précipitations à 1068 mètres d'altitude (barrage du Peilhou) pour les périodes 1948-1974 et 1990-2010 et à 760 mètres d'altitude (usine hydroélectrique du Baralet) pour la période 1975-2010 et 1990-2010 sont également indiquées. Cette illustration a été réalisée à partir des données mensuelles fournies en 2015 par EDF (rapport interne). .... 57

Figure II.15. Cumuls mensuels de précipitations entre janvier 2010 et juin 2016 relevés automatiquement par la station MétéoFrance 64542006 Urdo RN134 au niveau des Forges d'Abel à 1074 m d'altitude (zone sud du massif de la Cristallère). Cette illustration a été réalisée

à partir des données mensuelles de MétéoFrance récupérées en septembre 2017 via ce lien <https://donneespubliques.meteofrance.fr/>..... 58

Figure II.16. Cumuls mensuels de précipitations pour l'année 2010 relevés [a] par EDF au niveau du barrage du Peillhou à 1068 m d'altitude et [b] automatiquement par la station MétéoFrance 64542006 Urdo RN134 au niveau des Forges d'Abel à 1074 m d'altitude. Les stations sont proches géographiquement. Cette illustration a été réalisée à partir des données mensuelles de 2010 fournies en 2015 par EDF (rapport interne) et celles de MétéoFrance récupérées via ce lien <https://donneespubliques.meteofrance.fr/> en septembre 2017. .... 59

Figure II.17. La sismicité instrumentale et les plus grands événements historiques (avec une intensité macrosismique MSK 1964 à l'épicentre maximale VIII et IX, ou répertoriés comme importants, mais sans intensité calculée) au niveau de la chaîne des Pyrénées (d'après Honoré et al., 2011 in Lebourg et al., 2014 ; modifié). FNP : faille nord-pyrénéenne. DSGSD et DSL cosismiques : (1) Zarroca et al. (2012) ; (2) Gutiérrez et al. (2012a) ; (3) Gutiérrez-Santolalla et al. (2005) ; (4) Gutiérrez et al. (2008). .... 60

Figure II.18. Témoignage du séisme du Lavédan en 580 par Grégoire de Tours, évêque et historien de l'Église et des Francs (Alexandre, 1990). .... 62

Figure II.19. Séismes survenus dans un rayon de 50 kilomètres autour du massif de la Cristallère pour la période 2013-2016 en fonction de leurs magnitudes (MLv). Cette illustration a été réalisée à partir des données du Réseau National de Surveillance Sismique (RéNaSS, <http://renass.unistra.fr/recherche>, dernière consultation en mai 2017). .... 63

Figure II.20. Les principales unités structurales de la chaîne des Pyrénées avec FNP, la faille nord-pyrénéenne, CFNP le chevauchement frontal nord-pyrénéen et CFSP le chevauchement frontal sud-pyrénéen (d'après Choukroune, 1992 in Souriau et al., 2014 ; modifié). .... 64

Figure II.21. Stratigraphie synthétique des principales formations géologiques rencontrées dans les zones nord et axiale des Pyrénées d'après Delfaud et al. (1980) in Geoval ([http://www.geoval.fr/images/Geoval/documentation/pyr\\_strat\\_chart.pdf](http://www.geoval.fr/images/Geoval/documentation/pyr_strat_chart.pdf), mai 2017). Pour le massif de la Cristallère, les formations sont essentiellement celles du Dévonien calcaire, du Carbonifère schisto-gréseux (« Culm ») et du Permo-Trias rouge à grès, argilites, calcaires et sills volcaniques liés au volcanisme du Pic du Midi d'Ossau. .... 65

Figure II.22. Carte géologique simplifiée de la haute Vallée d'Aspe (d'après Lebourg et al., 2014 ; modifié). .... 66

Figure II.23. Schéma explicatif des trois phases hercyniennes de plissement reconnues au sud du massif de la Cristallère au niveau du Somport d'après Bichot (1986). ..... 68

Figure II.24. L'anticlinal du Lazaret affecte les calcaires du Dévonien avec son axe de pli hectométrique de la première phase hercynienne N120°, fortement redressé par la deuxième phase de direction subméridienne N-S : ortho-image 2012 de l'IGN annotée (récupérée sur <http://professionnels.ign.fr/> en mars 2016) montrant la position de la charnière et l'axe de pli en blanc [a] ; prise de vue de la charnière de l'anticlinal depuis l'ouest [b] et son schéma explicatif (l'axe est positionné avec son plongement de 15° vers l'est) [c]. 70

Figure II.25. Coupe synthétique S-N des structures plicatives de la phase 4 en rive gauche du gave d'Aspe entre le col le Lapachouaou et le Pic du Baralet [a]. Schéma récapitulatif des plis en genou déjetés vers le sud (A1 à S4) avec les plans de schistosité s1 de la phase 4 (schistosité de clivage notée SA2 par Bixel et al., 1985), et les failles conjuguées F1 et F2 tardives N90° à N110° [b]. Photographie de détail de la charnière anticlinale A1 du Pic du Baralet (pli en genou) qui montre les plans de clivage de la schistosité S1 inclinés de 45-55° nord [c]. ... 72

Figure II.26. Coupes géologiques synthétiques S-N de la rive gauche [a] (d'après Lebourg, 2000 & Lebourg et al, 2003 ; modifié) et de la rive droite [b] de la haute Vallée d'Aspe. .... 73

Figure II.27. Carte structurale de la haute vallée d'Aspe montrant : a) la trace cartographique des principaux axes de plis anticlinaux et synclinaux (7 et 8) liés à la tectonique polyphasée hercynienne et alpine (SV1, SA2 et nappe) ; b) les principaux accidents N50°, N90°, N170° et N-S (5) et les accidents chevauchants hercyniens repris et tordus à l'alpin (6) (Fabre et al, 2016 ; modifié)..... 74

Figure II.28. Coupe structurale schématique de la « zone axiale » des Pyrénées (d'après Muller et Roger, 1977) montrant la courbure des axes de plis de la phase hercynienne SV2 et de la phase alpine SA2 en liaison avec une nappe de recouvrement tardive alpine. L'encart rouge positionne les coupes géologiques synthétiques S-N des rives gauche et droite de la haute Vallée d'Aspe (cf. Figure II.26) où A correspond aux Pics de Gadebaille/Arnousse et B aux Pics de Larry/Cristallère..... 75

Figure II.29. Le DSL de la Cristallère (Lebourg et al., 2014 ; modifié) : carte morphostructurale montrant les caractéristiques principales de déformation [a] et coupe simplifiée [b]. Légende complémentaire : Figure II.22. .... 77

Figure II.30. Évolution de la Pène du Thès - images aériennes IGN rectifiées de [a] 1948 et [b] 1978 (Thomas, 2013 ; modifié). Projection RGF93 Lambert 93. Commentaires dans le texte.....	80
Figure II.31. Évolution de la Pène du Thès - ortho-images aériennes IGN de [a] 1998 et [b] 2008 (Thomas, 2013 ; modifié). Projection RGF93 Lambert 93. Commentaires dans le texte.....	81
Figure II.32. Suivi de l'évolution de la Pène du Thès. Illustration réalisée à partir des données ONF/RTM (Dufour, 2016). Cf. « instabilité gravitaire de la zone nord », Figure II.31a pour localiser la zone de suivi. Fond ortho-image 2012 de l'IGN récupérée sur <a href="http://professionnels.ign.fr/">http://professionnels.ign.fr/</a> en mars 2016.....	82
Figure III.1. Description schématique d'un système « Global Navigation Satellite Systems » (GNSS).....	90
Figure III.2. Schémas de principes du positionnement absolu [a] et différentiel [b] (Duquenne et al., 2005 ; modifié).....	91
Figure III.3. État du réseau RGP pendant l'étude (période 2014-2016). Positions des stations RGP et des sites géodésiques RDB de l'IGN dans les environs du massif de la Cristallère. Les données sont disponibles gratuitement sur le site <a href="http://rgp.ign.fr/">http://rgp.ign.fr/</a> (dernière consultation en mars 2017).....	93
Figure III.4. Situation du point de référence PR, des 6 points cibles RB du réseau de base et des 2 réseaux de détails retenus (RD1 et RD2) du massif de la Cristallère pour le positionnement par satellites DGNSS (constellations GPS & GLONASS). Les réseaux non retenus pour l'étude sont aussi indiqués : RNR1, RNR2, RNR3 et RNR4. Fond ortho-image 2012 de l'IGN récupérée sur <a href="http://professionnels.ign.fr/">http://professionnels.ign.fr/</a> en mars 2016.....	96
Figure III.5. Localisation du point de référence PR dans le site géodésique Urdos n°64542A du réseau de base de l'IGN au niveau du Col du Somport. Fond ortho-image 2012 de l'IGN récupérée sur <a href="http://professionnels.ign.fr/">http://professionnels.ign.fr/</a> en mars 2016. ....	97
Figure III.6. Photographie commentée du point cible RB2 prise lors de l'acquisition des points cibles du réseau de base du massif de la Cristallère. ....	98
Figure III.7. Localisation des points cibles RDA du réseau de détail n°1 du massif de la Cristallère. Les points cibles (RDA1 à RDA20) sont positionnés de part et d'autre de l'accident majeur représenté en pointillé ici qui conditionne l'escarpement principal du DSL de la	

Cristallère. Fond ortho-image 2012 de l'IGN récupérée sur <http://professionnels.ign.fr/> en mars 2016..... 99

Figure III.8. Localisation des points cibles RDB du réseau de détail n°2 du massif de la Cristallère [a] ; le tracé de la galerie souterraine EDF est volontairement partiel. Fond ortho-image 2012 de l'IGN récupérée sur <http://professionnels.ign.fr/> en mars 2016. Photographie commentée des points cibles RDB11 et RB5 prise lors de l'acquisition des points cibles du réseau de détail n°2 du massif de la Cristallère [b]..... 100

Figure III.9. Schéma d'observation pour l'acquisition des points cibles RB du réseau de base du massif de la Cristallère en mode statique géodésique avec le pivot PR (point de référence au col du Somport). Commentaires dans le texte. .... 104

Figure III.10. Schéma d'observation pour l'acquisition des points cibles RDA du réseau de détail n°1 du massif de la Cristallère en mode statique rapide avec le pivot RB3 du réseau de base. Commentaires dans le texte. .... 105

Figure III.11. L'eBee de senseFly [a] avec représentation de sa face supérieure[b] et de sa face inférieure [c] (SenseFly, 2014). .... 110

Figure III.12. Étape 1 : exemple de nuage 3D épars texturé obtenu pour la campagne 2015. .... 112

Figure III.13. Étape 2 : exemple de nuage 3D densifié texturé obtenu pour la campagne 2015. .... 113

Figure III.14. Étape 3 : exemple de nuage 3D densifié texturé complet obtenu pour la campagne 2015..... 113

Figure III.15. Exemple de données de sorties pour la campagne de l'automne 2015 : orthomosaique d'images [a] et modèle numérique de surface simplifié [b]. .... 114

Figure III.16. Synthèse de l'ensemble des mesures et des observations faites sur le massif de la Cristallère. Commentaires dans le texte. .... 118

Figure IV.1. Résumé des méthodes utilisées pour l'auscultation DGNSS sur le massif de la Cristallère. RGP : Réseau Géodésique Permanent. PR : Point de référence. RB3 et RB5 : deux points cibles du réseau de base du massif de la Cristallère. .... 121

Figure IV.2. Déplacements altimétriques et planimétriques des points cibles RB du réseau de base mesurés avec la méthode de positionnement multistations RGP entre [a] le 1<sup>er</sup>

octobre 2015 et le 3 juin 2016 ; [b] le 1<sup>er</sup> octobre 2015 et le 16 mai 2016 ; [c] le 16 mai et le 3 juin 2016..... 124

Figure IV.3. Schéma de synthèse du modèle n°1 (méthode de positionnement multistations RGP) : entre [a] le 1<sup>er</sup> octobre 2015 et le 3 juin 2016 ; [b] le 1<sup>er</sup> octobre 2015 et le 16 mai 2016 ; [c] le 16 mai et le 3 juin 2016. ....125

Figure IV.4. Déplacements altimétriques et planimétriques des points cibles RB du réseau de base mesurés avec la méthode de positionnement statique pivot PR entre [a] le 1<sup>er</sup> octobre 2015 et le 3 juin 2016 ; [b] le 1<sup>er</sup> octobre 2015 et le 16 mai 2016 ; [c] le 16 mai et le 3 juin 2016..... 126

Figure IV.5. Schéma de synthèse du modèle n°2 (méthode de positionnement statique pivot PR) : entre [a] le 1<sup>er</sup> octobre 2015 et le 3 juin 2016 ; [b] le 1<sup>er</sup> octobre 2015 et le 16 mai 2016 ; [c] le 16 mai et le 3 juin 2016..... 128

Figure IV.6. Schéma de synthèse de l'auscultation DGNSS (constellations GPS & GLONASS) du réseau de base du massif de la Cristallère : méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1) versus méthode de positionnement statique pivot PR (modèle n°2).....133

Figure IV.7. Déplacements altimétriques et planimétriques des points cibles RDA du réseau de détail n°1 mesurés avec la méthode de positionnement multistations RGP entre [a] le 30 octobre 2014 et le 7 juin 2016 ; [b] le 30 octobre 2014 et le 17 mai 2016 ; [c] le 17 mai et le 7 juin 2016. Les points cibles (RDA1 à RDA20) sont positionnés de part et d'autre de l'accident majeur qui conditionne l'escarpement principal du DSL de la Cristallère. ....137

Figure IV.8. Déplacements altimétriques et planimétriques des points cibles RDA du réseau de détail n°1 mesurés avec la méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR entre le 17 mai et le 7 juin 2016 (21 jours). Les points cibles (RDA1 à RDA8, RDA10 à RDA13 et RDA15) sont positionnés de part et d'autre de l'accident majeur qui conditionne l'escarpement principal du DSL de la Cristallère..... 138

Figure IV.9. Déplacements altimétriques et planimétriques des points cibles RDB du réseau de détail n°2 (partie 1 ; partie haute du bourrelet frontal du DSL de la Cristallère) mesurés avec la méthode de positionnement multistations RGP entre [a] le 9 janvier 2015 et le 9 juin 2016 ; [b] le 9 janvier 2015 et le 20 mai 2016 ; [c] le 20 mai et le 9 juin 2016..... 148

Figure IV.10. Déplacements altimétriques et planimétriques des points cibles RDB du réseau de détail n°2 (partie 2 ; partie basse du bourrelet frontal du DSL de la Cristallère)

mesurés avec la méthode de positionnement multistations RGP entre [a] le 8 octobre 2015 et le 9 juin 2016 ; [b] le 8 octobre 2015 et le 20 mai 2016 ; [c] le 20 mai et le 9 juin 2016..... 149

Figure IV.11. Déplacements altimétriques et planimétriques des points cibles RDB du réseau de détail n°2 (partie 1 ; partie haute du bourrelet frontal du DSL de la Cristallère) mesurés avec la méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR entre le 20 mai et le 9 juin 2016..... 150

Figure IV.12. Déplacements altimétriques et planimétriques des points cibles RDB du réseau de détail n°2 (partie 2 ; partie basse du bourrelet frontal du DSL de la Cristallère) mesurés avec la méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR entre [a] le 8 octobre 2015 et le 9 juin 2016 ; [b] le 8 octobre 2015 et le 20 mai 2016 ; [c] le 20 mai et le 9 juin 2016..... 151

Figure IV.13. Nuage de points 3D texturé complet au niveau de la partie sommitale du DSL de la Cristallère avec sa zone la plus active (la Pène du Thès). Résultat obtenu à partir du traitement des vols « 2014\_v1 » et « 2014\_v2 ». .....165

Figure IV.14. Nuage de points 3D texturé complet de l'ensemble du massif de la Cristallère pour la campagne 2015.....167

Figure IV.15. Exemple de point GCP pour la campagne 2015 : le point cible RB3 du réseau de base. .... 168

Figure IV.16. Exemple de point de contrôle pour la campagne 2015 : le point cible RDB17 du réseau de détail n°2..... 169

Figure IV.17. Nuage de points 3D texturé complet au niveau de la Pène du Thès (zone active du DSL de La Cristallère). Résultat obtenu à partir du traitement du vol « 2016\_v1 ». ..... 170

Figure IV.18. Nuage de points 3D texturé complet au niveau de la partie basse du glissement rocheux complexe du Peilhou. Résultat obtenu à partir du traitement du vol « 2016\_v2 »..... 171

Figure IV.19. Cartes structurales en perspective 3D dans les limites du DSL avec : la fracturation [a] et les différents plateaux [b] marqués par six lignes rouges qui les délimitent. Chaque plateau se situe au-dessus des lignes rouges, et chaque ligne rouge correspond à un escarpement secondaire dont la direction est guidée par le réseau principal de fracturation. ....174

Figure IV.20. Modèle dynamique des déplacements actuels du DSL de la Cristallère en perspective 3D montrant comment les différents plateaux se déstructurent en différents blocs hectométriques avec des déplacements généraux vers le sud/sud-est, le nord/nord-est ou l'est à sud-est. Au nord et en partie basse est noté le mouvement qui affecte le grand cône de déjection au-dessus de Bérat du Bas.....177

Figure IV.21. Déplacements minimaux avérés en millimètres au niveau de la partie sommitale du DSL de la Cristallère entre le 30 octobre 2014 et le 7 juin 2016 [a] et plus précisément entre le 17 mai et le 7 juin 2016 [b] sur le nuage de points 3D texturé obtenu avec la campagne drone 2015. L'accident principal N-S qui conditionne l'escarpement est représenté en pointillé. ....178

Figure IV.22. Coupe géologique synthétique ouest-est passant par le sommet de la Cristallère et montrant i) les accidents subméridiens à l'origine du DSL et ii) les plateaux successifs entre 1850 et 950 mètres d'altitude. Notons la présence de sources en pied de plateau et la structure inclinée plongeant vers l'ouest du substratum paléozoïque. ....179

Figure A1.1. Évolution en mètres de la composante est (E) du point de référence PR reportée dans le système RGF93 Lambert 93. Vérification de la stabilité de PR par rapport à la position annoncée par l'IGN. ....209

Figure A1.2. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point de référence PR reportée dans le système RGF93 Lambert 93. Vérification de la stabilité de PR par rapport à la position annoncée par l'IGN. .... 210

Figure A1.3. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point de référence PR. Vérification de la stabilité de PR par rapport à la position annoncée par l'IGN..... 210

Figure A1.4. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RB1 du réseau de base reportée dans le système RGF93 Lambert 93..... 211

Figure A1.5. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RB1 du réseau de base reportée dans le système RGF93 Lambert 93..... 212

Figure A1.6. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RB1 du réseau de base..... 212

Figure A1.7. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RB2 du réseau de base reportée dans le système RGF93 Lambert 93.....	213
Figure A1.8. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RB2 du réseau de base reportée dans le système RGF93 Lambert 93.....	214
Figure A1.9. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RB2 du réseau de base.....	214
Figure A1.10. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RB3 du réseau de base reportée dans le système RGF93 Lambert 93.....	215
Figure A1.11. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RB3 du réseau de base reportée dans le système RGF93 Lambert 93.....	216
Figure A1.12. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RB3 du réseau de base.....	216
Figure A1.13. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RB4 du réseau de base reportée dans le système RGF93 Lambert 93.....	217
Figure A1.14. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RB4 du réseau de base reportée dans le système RGF93 Lambert 93.....	218
Figure A1.15. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RB4 du réseau de base.....	218
Figure A1.16. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RB5 du réseau de base reportée dans le système RGF93 Lambert 93.....	219
Figure A1.17. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RB5 du réseau de base reportée dans le système RGF93 Lambert 93.....	220
Figure A1.18. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RB5 du réseau de base.....	220
Figure A1.19. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RB6 du réseau de base reportée dans le système RGF93 Lambert 93.....	221
Figure A1.20. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RB6 du réseau de base reportée dans le système RGF93 Lambert 93.....	222

Figure A1.21. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RB6 du réseau de base.....	222
Figure A1.22. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA1 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.....	223
Figure A1.23. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA1 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.....	224
Figure A1.24. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA1 du réseau de détail n°1.....	224
Figure A1.25. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA2 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.....	225
Figure A1.26. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA2 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.....	226
Figure A1.27. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA2 du réseau de détail n°1.....	226
Figure A1.28. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA3 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.....	227
Figure A1.29. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA3 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.....	228
Figure A1.30. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA3 du réseau de détail n°1.....	228
Figure A1.31. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA4 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.....	229
Figure A1.32. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA4 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.....	230
Figure A1.33. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA4 du réseau de détail n°1.....	230
Figure A1.34. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA5 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.....	231

Figure A1.35. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA5 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93.....	232
Figure A1.36. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA5 du réseau de détail n°1. ....	232
Figure A1.37. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA6 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	233
Figure A1.38. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA6 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	234
Figure A1.39. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA6 du réseau de détail n°1. ....	234
Figure A1.40. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA7 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	235
Figure A1.41. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA7 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	236
Figure A1.42. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA7 du réseau de détail n°1. ....	236
Figure A1.43. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA8 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	237
Figure A1.44. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA8 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	238
Figure A1.45. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA8 du réseau de détail n°1. ....	238
Figure A1.46. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA9 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	239
Figure A1.47. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA9 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	240
Figure A1.48. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA9 du réseau de détail n°1. ....	240

Figure A1.49. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA10 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	241
Figure A1.50. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA10 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	242
Figure A1.51. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA10 du réseau de détail n°1. ....	242
Figure A1.52. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA11 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	243
Figure A1.53. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA11 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	244
Figure A1.54. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA11 du réseau de détail n°1. ....	244
Figure A1.55. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA12 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	245
Figure A1.56. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA12 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	246
Figure A1.57. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA12 du réseau de détail n°1. ....	246
Figure A1.58. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA13 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	247
Figure A1.59. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA13 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	248
Figure A1.60. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA13 du réseau de détail n°1. ....	248
Figure A1.61. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA14 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	249
Figure A1.62. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA14 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	250

Figure A1.63. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA14 du réseau de détail n°1. ....	250
Figure A1.64. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA15 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	251
Figure A1.65. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA15 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	252
Figure A1.66. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA15 du réseau de détail n°1. ....	252
Figure A1.67. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA16 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	253
Figure A1.68. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA16 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	254
Figure A1.69. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA16 du réseau de détail n°1. ....	254
Figure A1.70. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA17 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	255
Figure A1.71. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA17 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	256
Figure A1.72. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA17 du réseau de détail n°1. ....	256
Figure A1.73. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA18 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	257
Figure A1.74. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA18 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	258
Figure A1.75. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA18 du réseau de détail n°1. ....	258
Figure A1.76. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA19 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	259

Figure A1.77. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA19 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	260
Figure A1.78. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA19 du réseau de détail n°1. ....	260
Figure A1.79. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDA20 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	261
Figure A1.80. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDA20 du réseau de détail n°1 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	262
Figure A1.81. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDA20 du réseau de détail n°1. ....	262
Figure A1.82. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB1 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	263
Figure A1.83. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB1 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	264
Figure A1.84. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) d du point RDB1 du réseau de détail n°2. ....	264
Figure A1.85. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB2 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	265
Figure A1.86. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB2 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	266
Figure A1.87. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB2 du réseau de détail n°2. ....	266
Figure A1.88. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB3 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	267
Figure A1.89. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB3 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	268
Figure A1.90. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB3 du réseau de détail n°2. ....	268

Figure A1.91. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB4 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	269
Figure A1.92. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB4 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	270
Figure A1.93. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB4 du réseau de détail n°2. ....	270
Figure A1.94. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB5 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	271
Figure A1.95. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB5 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	272
Figure A1.96. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB5 du réseau de détail n°2. ....	272
Figure A1.97. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB6 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	273
Figure A1.98. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB6 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	274
Figure A1.99. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB6 du réseau de détail n°2. ....	274
Figure A1.100. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB7 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	275
Figure A1.101. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB7 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	276
Figure A1.102. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB7 du réseau de détail n°2. ....	276
Figure A1.103. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB8 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	277
Figure A1.104. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB8 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	278

Figure A1.105. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB8 du réseau de détail n°2.....	278
Figure A1.106. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB9 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	279
Figure A1.107. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB9 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	280
Figure A1.108. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB9 du réseau de détail n°2.....	280
Figure A1.109. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB10 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	281
Figure A1.110. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB10 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	282
Figure A1.111. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB10 du réseau de détail n°2.....	282
Figure A1.112. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB11 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	283
Figure A1.113. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB11 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	284
Figure A1.114. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB11 du réseau de détail n°2.....	284
Figure A1.115. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB12 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	285
Figure A1.116. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB12 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	286
Figure A1.117. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB12 du réseau de détail n°2.....	286
Figure A1.118. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB13 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	287

Figure A1.119. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB13 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	288
Figure A1.120. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB13 du réseau de détail n°2. ....	288
Figure A1.121. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB14 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	289
Figure A1.122. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB14 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	290
Figure A1.123. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB14 du réseau de détail n°2. ....	290
Figure A1.124. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB15 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	291
Figure A1.125. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB15 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	292
Figure A1.126. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB15 du réseau de détail n°2. ....	292
Figure A1.127. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB16 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	293
Figure A1.128. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB16 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	294
Figure A1.129. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB16 du réseau de détail n°2. ....	294
Figure A1.130. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB17 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	295
Figure A1.131. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB17 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	296
Figure A1.132. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB17 du réseau de détail n°2. ....	296

Figure A1.133. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB18 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	297
Figure A1.134. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB18 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	298
Figure A1.135. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB18 du réseau de détail n°2. ....	298
Figure A1.136. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB19 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	299
Figure A1.137. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB19 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	300
Figure A1.138. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB19 du réseau de détail n°2. ....	300
Figure A1.139. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB20 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	301
Figure A1.140. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB20 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	302
Figure A1.141. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB20 du réseau de détail n°2. ....	302
Figure A1.142. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB21 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	303
Figure A1.143. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB21 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	304
Figure A1.144. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB21 du réseau de détail n°2. ....	304
Figure A1.145. Évolution en mètres de la composante est (E) du point RDB22 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	305
Figure A1.146. Évolution en mètres de la composante nord (N) du point RDB22 du réseau de détail n°2 reportée dans le système RGF93 Lambert 93. ....	306

Figure A1.147. Évolution en mètres de l'altitude NGF-IGN69 (Z) du point RDB22 du réseau de détail n°2.....306

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1. Articles consacrés aux instabilités gravitaires, recensées en France depuis le 1 <sup>er</sup> janvier 2001 qui ont eu des conséquences matérielles et/ou humaines. Tableau réalisé à partir d'une recherche pour l'événement « mouvements de terrain » sur la base de données de l'observatoire permanent des CATastrophes NATurelles et des risques naturels ( <a href="https://www.catnat.net/">https://www.catnat.net/</a> , dernière consultation en mars 2017).....	24
Tableau II.2. Les avalanches rocheuses et les glissements rocheux les plus catastrophiques depuis le début du XXe siècle spatialement associés à une instabilité gravitaire de grande ampleur du type DSGSD d'après Pánek & Klimeš (2016).....	33
Tableau II.3. Exemples de 18 instabilités gravitaires de grandes ampleurs du type DSGSD ou du type DSL avec estimation de l'âge et de la dynamique passée à partir d'une ou plusieurs méthodes de datation d'après Pánek & Klimeš (2016) ; modifié. [n.p.] : donnée non précisée.....	47
Tableau II.4. Exemples de 5 instabilités gravitaires de grandes ampleurs de type DSGSD surveillées d'après Pánek & Klimeš (2016 ; extrait) : estimation de la dynamique à court terme. [n.p.] : donnée non précisée.....	49
Tableau II.5. Rapport des indidents et des solutions mises en œuvres par EDF entre 1930 et 1945 au niveau de la galerie drainante de la centrale hydroélectrique du Baralet dans le secteur Lapédagne (d'après EDF, 1950).....	55
Tableau II.6. Déplacements totaux cumulés en mètres des points cibles depuis leurs implantations (d'après Dufour, 2016 ; extrait). (I) : implantation d'un point cible. (D) : disparition d'un point cible. ....	83
Tableau III.1. Précision du positionnement par satellites statique géodésique en fonction de la longueur des lignes de bases pour deux récepteurs bifréquences (Duquenne et al., 2005). ....	94
Tableau III.2. Caractéristiques principales des stations RGP dans un rayon de 100 km du massif de la Cristallère. ....	94

Tableau III.3. Chronologie de l'ensemble des mesures de positionnement DGNSS effectuées sur le massif de la Cristallère avec les constellations GPS & GLONASS.....	106
Tableau III.4. Chronologie de l'ensemble des campagnes d'observations effectuées avec le drone.....	115
Tableau IV.1. Rappel des caractéristiques principales des 6 points cibles RB du réseau de base du massif de la Cristallère (cf. partie III.1 pour plus de précisions)..	122
Tableau IV.2. Précisions altimétriques dV en centimètres des mesures moyennes des 6 points cibles RB du réseau de base du massif de la Cristallère : méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1) versus méthode de positionnement statique pivot PR (modèle n°2).....	129
Tableau IV.3. Précisions planimétriques dH en centimètres des mesures moyennes des 6 points cibles RB du réseau de base du massif de la Cristallère : méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1) versus méthode de positionnement statique pivot PR (modèle n°2).....	130
Tableau IV.4. Quotient dV/dH des précisions altimétriques (dV) et planimétriques (dH) des mesures moyennes des 6 points cibles RB du réseau de base du massif de la Cristallère : méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1) versus méthode de positionnement statique pivot PR (modèle n°2). .....	131
Tableau IV.5. Modèle n°2 : estimation des déplacements minimaux avérés $D_{\min}$ (mm) et des vitesses annuelles minimales avérées d'évolution $V_{\min}$ (mm/an) au niveau des composantes est (E) et nord (N) reportées dans le système RGF93 Lambert 93 et de l'altitude NGF-IGN69 (Z). Direction principale d'évolution horizontale (ouest [W], nord [N], est [E] ou sud [S]). [n.s.p.] : pas d'estimation possible. Commentaires dans le texte. ....	135
Tableau IV.6. Précisions altimétriques dV en centimètres des mesures moyennes des 20 points cibles RDA du réseau de détail n°1 : méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1A) versus méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR (modèle n°2A). [-] : pas de mesure. ....	139
Tableau IV.7. Précisions planimétriques dH en centimètres des mesures moyennes des 20 points cibles RDA du réseau de détail n°1 : méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1A) versus méthode de positionnement statique pivot RB3-PR (modèle n°2A). [-] : pas de mesure.....	141

Tableau IV.8. Modèle n°1A : estimation des déplacements minimaux avérés  $D_{min}$  (mm) et des vitesses annuelles minimales avérées d'évolution  $V_{min}$  (mm/an) au niveau des composantes est (E) et nord (N) reportées dans le système RGF93 Lambert 93 et de l'altitude NGF-IGN69 (Z) de chaque point cible RDA selon la période d'étude entre le 30 octobre 2014 et le 7 juin 2016. Type d'évolution verticale : soulèvement [s] ou affaissement [a]. Direction principale d'évolution horizontale (ouest [W], nord [N], est [E] ou sud [S]). [n.s.p.] : pas d'estimation possible. [-] : pas de mesure. Les points cibles (RDA1 à RDA20) sont positionnés de part et d'autre de l'accident majeur qui conditionne l'escarpement principal du DSL de la Cristallère ; RDA2 à RDA5 dans la zone sommitale du versant ouest (\*), RDA9 à RDA18 dans la zone sommitale du versant est (\*\*), RDA1, RDA6 à RDA8, RDA19 et RDA20 sur la ligne de crête (\*\*\*) massif de la Cristallère. .... 142

Tableau IV.9. Modèle n°2A : estimation des déplacements avérés minimaux  $D_{min}$  (mm) et des vitesses annuelles minimales avérées d'évolution  $V_{min}$  (mm/an) au niveau des composantes est (E) et nord (N) reportées dans le système RGF93 Lambert 93 et de l'altitude NGF-IGN69 (Z) de chaque point cible RDA selon la période d'étude entre le 30 octobre 2014 et le 7 juin 2016. Type d'évolution verticale : soulèvement [s] ou affaissement [a]. Direction principale d'évolution horizontale (ouest [W], nord [N], est [E] ou sud [S]). [n.s.p.] : pas d'estimation possible. [-] : pas de mesure. Les points cibles (RDA1 à RDA20) sont positionnés de part et d'autre de l'accident majeur qui conditionne l'escarpement principal du DSL de la Cristallère ; RDA2 à RDA5 dans la zone sommitale du versant ouest (\*), RDA9 à RDA18 dans la zone sommitale du versant est (\*\*), RDA1, RDA6 à RDA8, RDA19 et RDA20 sur la ligne de crête (\*\*\*) du massif de la Cristallère. .... 144

Tableau IV.10. Précisions altimétriques dV en centimètres des mesures moyennes des 22 points cibles RDB du réseau de détail n°2 du site expérimental : méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1B) versus méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR (modèle n°2B). [-] : pas de mesure. ....153

Tableau IV.11. Précisions planimétriques dH en centimètres des mesures moyennes des 22 points cibles RDB du réseau de détail n°2 du site expérimental : méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1B) versus méthode de positionnement statique pivot RB5-PR (modèle n°2B). [-] : pas de mesure. ....154

Tableau IV.12. Modèle n°1B - Partie 1 du réseau de détail n°2 : estimation des déplacements minimaux avérés  $D_{min}$  (mm) et des vitesses annuelles minimales avérées d'évolution  $V_{min}$  (mm/an) au niveau des composantes est (E) et nord (N) reportées dans le système RGF93 Lambert 93 et de l'altitude NGF-IGN69 (Z) de chaque point cible RDB (RDB1 à RDB12) selon la période d'étude entre le 9 janvier 2015 et le 9 juin 2016. Type d'évolution verticale : soulèvement [s] ou affaissement [a]. Direction principale d'évolution horizontale

(ouest [W], nord [N], est [E] ou sud [S]). [n.s.p.] : pas d'estimation possible. [-] : pas de mesure.  
.....156

Tableau IV.13. Modèle n°2B - Partie 1 du réseau de détail n°2 : estimation des déplacements minimaux avérés  $D_{\min}$  (mm) et des vitesses annuelles minimales d'évolution avérées  $V_{\min}$  (mm/an) au niveau des composantes est (E) et nord (N) reportées dans le système RGF93 Lambert 93 et de l'altitude NGF-IGN69 (Z) de chaque point cible RDB (RDB1 à RDB12) selon la période d'étude entre le 9 janvier 2015 et le 9 juin 2016. Type d'évolution verticale : soulèvement [s] ou affaissement [a]. Direction principale d'évolution horizontale (ouest [W], nord [N], est [E] ou sud [S]). [n.s.p.] : pas d'estimation possible. [-] : pas de mesure. ....157

Tableau IV.14. Modèle n°1B - Partie 2 du réseau de détail n°2 (méthode de positionnement multistations RGP) : estimation des déplacements minimaux avérés  $D_{\min}$  (mm) et des vitesses annuelles minimales avérées d'évolution  $V_{\min}$  (mm/an) au niveau des composantes est (E) et nord (N) reportées dans le système RGF93 Lambert 93 et de l'altitude NGF-IGN69 (Z) de chaque point cible RDB (RDB9 à RDB22) selon la période d'étude entre le 8 octobre 2015 et le 9 juin 2016. Type d'évolution verticale : soulèvement [s] ou affaissement [a]. Direction principale d'évolution horizontale (ouest [W], nord [N], est [E] ou sud [S]). [n.s.p.] : pas d'estimation possible. [-] : pas de mesure..... 158

Tableau IV.15. Modèle n°2B - Partie 2 du réseau de détail n°2 (méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR) : estimation des déplacements minimaux avérés  $D_{\min}$  (mm) et des vitesses annuelles minimales avérées d'évolution  $V_{\min}$  (mm/an) au niveau des composantes est (E) et nord (N) reportées dans le système RGF93 Lambert 93 et de l'altitude NGF-IGN69 (Z) de chaque point cible RDB (RDB9 à RDB22) selon la période d'étude entre le 8 octobre 2015 et le 9 juin 2016. Type d'évolution verticale : soulèvement [s] ou affaissement [a]. Direction principale d'évolution horizontale (ouest [W], nord [N], est [E] ou sud [S]). [n.s.p.] : pas d'estimation possible. [-] : pas de mesure. .... 160

Tableau IV.16. Date d'acquisition et nombre de photos géolocalisées obtenues pour chaque vol effectué sur le massif de la Cristallère pour les campagnes 2014, 2015 et 2016. 163

Tableau IV.17. Précisions en mètres des prises de vues avant optimisation pour la campagne 2014 : précision horizontale (XY) et précision verticale (Z)..... 164

Tableau IV.18. Caractéristiques des sous-projets du traitement de la campagne 2014.  
..... 164

Tableau IV.19. Précisions en mètres des prises de vues avant optimisation pour la campagne 2015 : précision horizontale (XY) et précision verticale (Z)..... 166

Tableau IV.20. Caractéristiques des sous-projets du traitement de la campagne 2015. .....	166
--	-----

Tableau A1.1. Coordonnées du point de référence PR avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.....	209
---	-----

Tableau A1.2. Coordonnées du point RB1 du réseau de base avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.....	211
---	-----

Tableau A1.3. Coordonnées du point RB2 du réseau de base avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.....	213
---	-----

Tableau A1.4. Coordonnées du point RB3 du réseau de base avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.....	215
---	-----

Tableau A1.5. Coordonnées du point RB4 du réseau de base avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.....	217
---	-----

Tableau A1.6. Coordonnées du point RB5 du réseau de base avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.....	219
---	-----

Tableau A1.7. Coordonnées du point RB6 du réseau de base avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres.....	221
---	-----

Tableau A1.8. Coordonnées du point RDA1 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 223

Tableau A1.9. Coordonnées du point RDA2 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 225

Tableau A1.10. Coordonnées du point RDA3 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 227

Tableau A1.11. Coordonnées du point RDA4 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 229

Tableau A1.12. Coordonnées du point RDA5 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. ....231

Tableau A1.13. Coordonnées du point RDA6 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 233

Tableau A1.14. Coordonnées du point RDA7 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 235

Tableau A1.15. Coordonnées du point RDA8 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 237

Tableau A1.16. Coordonnées du point RDA9 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 239

Tableau A1.17. Coordonnées du point RDA10 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 241

Tableau A1.18. Coordonnées du point RDA11 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 243

Tableau A1.19. Coordonnées du point RDA12 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 245

Tableau A1.20. Coordonnées du point RDA13 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 247

Tableau A1.21. Coordonnées du point RDA14 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 249

Tableau A1.22. Coordonnées du point RDA15 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. ....251

Tableau A1.23. Coordonnées du point RDA16 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 253

Tableau A1.24. Coordonnées du point RDA17 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 255

Tableau A1.25. Coordonnées du point RDA18 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 257

Tableau A1.26. Coordonnées du point RDA19 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 259

Tableau A1.27. Coordonnées du point RDA20 du réseau de détail n°1 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 261

Tableau A1.28. Coordonnées du point RDB1 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 263

Tableau A1.29. Coordonnées du point RDB2 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 265

Tableau A1.30. Coordonnées du point RDB3 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 267

Tableau A1.31. Coordonnées du point RDB4 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 269

Tableau A1.32. Coordonnées du point RDB5 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. ....271

Tableau A1.33. Coordonnées du point RDB6 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 273

Tableau A1.34. Coordonnées du point RDB7 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 275

Tableau A1.35. Coordonnées du point RDB8 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 277

Tableau A1.36. Coordonnées du point RDB9 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 279

Tableau A1.37. Coordonnées du point RDB10 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 281

Tableau A1.38. Coordonnées du point RDB11 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. ....283

Tableau A1.39. Coordonnées du point RDB12 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. ....285

Tableau A1.40. Coordonnées du point RDB13 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 287

Tableau A1.41. Coordonnées du point RDB14 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. ....289

Tableau A1.42. Coordonnées du point RDB15 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 291

Tableau A1.43. Coordonnées du point RDB16 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 293

Tableau A1.44. Coordonnées du point RDB17 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 295

Tableau A1.45. Coordonnées du point RDB18 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 297

Tableau A1.46. Coordonnées du point RDB19 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 299

Tableau A1.47. Coordonnées du point RDB20 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. .... 301

Tableau A1.48. Coordonnées du point RDB21 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. ....303

Tableau A1.49. Coordonnées du point RDB22 du réseau de détail n°2 avec : (1) la composante est (E) et la composante nord (N) reportées en mètres dans le système RGF93 Lambert 93 ; (2) l'altitude NGF-IGN69 (Z) en mètres ; (3) la précision planimétrique (dH) et la précision altimétrique (dV) en centimètres. ....305



## TABLE DES MATIERES

<b>I. INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>15</b>
<b>II. ETAT DES CONNAISSANCES ET CADRE DE L'ETUDE .....</b>	<b>19</b>
<b>II.1 LES INSTABILITES GRAVITAIRES DE GRANDES AMPLEURS.....</b>	<b>21</b>
II.1.1 CONSTAT GENERAL ET REMARQUES .....	21
II.1.1.1 Macro analyse de l'état de la recherche scientifique de 1970 à 2015.....	21
a) Choix de la base de données et des critères .....	21
b) Évolution de la production scientifique entre 1970 et 2015 .....	22
c) Pays contributeurs pour la période 1970-2015 .....	26
d) Limites de cette macro analyse et remarques .....	28
II.1.1.2 Critique sur les classifications .....	30
II.1.1.3 Risque naturel .....	32
II.1.2 « DEEP-SEATED GRAVITATIONAL SLOPE DEFORMATION » (DSGSD) .....	34
II.1.2.1 Définition et terminologie .....	34
II.1.2.2 Distribution géographique .....	35
II.1.2.3 Probabilité d'occurrence .....	37
II.1.2.4 Caractéristiques typiques.....	38
II.1.2.5 Types et mécanismes.....	40
a) DSGSD type « sackung » .....	41

b) DSGSD type « lateral spreading ».....	43
II.1.3 DEFIS DE LA COMMUNAUTE SCIENTIFIQUE : DATATION ET SURVEILLANCE	44
II.1.3.1 Approches effectuées par les scientifiques et remarques .....	44
II.1.3.2 Datation : méthodes et exemples .....	46
II.1.3.3 Surveillance : méthodes et exemples .....	48
<b>II.2 LE MASSIF DE LA CRISTALLERE .....</b>	<b>51</b>
II.2.1 APERÇU GENERAL	51
II.2.1.1 Situation géographique .....	51
II.2.1.2 Les limites .....	51
II.2.1.3 Orohydrographie.....	52
II.2.1.4 Occupation des sols : un site « cryptoanthropisé » .....	52
a) L'ancienne voie ferrée Pau-Canfranc .....	54
b) L'exploitation hydraulique.....	54
II.2.1.5 Climat.....	56
a) Cumuls de précipitations entre 1948 et 2010 .....	56
b) Cumuls de précipitations depuis 2010.....	58
II.2.1.6 Sismicité.....	60
a) Sismicité historique.....	61
b) Sismicité actuelle.....	62
II.2.2 GEOLOGIE	64
II.2.2.1 Cadre et contexte géologique .....	64

II.2.2.2	Formations géologiques .....	65
II.2.2.3	Structure tectonique du Paléozoïque.....	67
a)	La première phase hercynienne (phase 1).....	69
b)	La deuxième phase hercynienne (phase 2).....	69
c)	La troisième phase hercynienne (phase 3).....	71
d)	La phase alpine (phase 4) .....	71
II.2.3	LES INSTABILITES GRAVITAIRES DU MASSIF DE LA CRISTALLERE	76
II.2.3.1	Le DSL de la Cristallère (Lebourg et al., 2014) .....	76
II.2.3.2	La Pène du Thès : une zone active du DSL de la Cristallère.....	79
a)	Suivi à moyen terme (Thomas, 2013 ; Thomas et al, 2013) .....	79
b)	Suivi à court terme .....	82
<b>II.3</b>	<b>SYNTHESE DE L'ETAT DES CONNAISSANCES ET DU CADRE DE L'ETUDE.....</b>	<b>85</b>
<b>III.</b>	<b>METHODOLOGIE .....</b>	<b>87</b>
<b>III.1</b>	<b>OUTILS ET METHODES POUR LE POSITIONNEMENT PAR SATELLITES DGNSS AVEC LES CONSTELLATIONS GPS &amp; GLONASS .....</b>	<b>89</b>
III.1.1	PRINCIPE DU POSITIONNEMENT PAR SATELLITES ET CHOIX	89
III.1.1.1	Description du système GNSS et choix des constellations.....	89
a)	Le système GPS .....	90
b)	Le système GLONASS .....	91
III.1.1.2	Les différents principes de positionnement.....	91
III.1.1.3	Choix des récepteurs terrestres.....	92
a)	Récepteur 1 : mobile.....	92

b) Récepteur 2 : base .....	92
III.1.2 DISPOSITION DE L'ENSEMBLE DES POINTS CIBLES SUR LE MASSIF DE LA CRISTALLERE	95
III.1.2.1 Localisation et rôle du point de référence PR.....	96
III.1.2.2 Localisation et rôle des points cibles RB du réseau de base.....	98
III.1.2.3 Localisation et rôle des points cibles des deux réseaux de détails .....	99
a) Localisation et rôle des points cibles RDA du réseau de détail n°1.....	99
b) Localisation et rôle des points cibles RDB du réseau de détail n°2 .....	100
III.1.3 ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNÉES TRIDIMENSIONNELLES PONCTUELLES	101
III.1.3.1 Acquisition du point de référence PR .....	101
III.1.3.2 Acquisition des points cibles RB du réseau de base .....	102
III.1.3.3 Acquisition des points cibles des réseaux de détails .....	102
III.1.3.4 Traitement des données (« Post-traitement » : correction différentielle).....	105
III.1.4 SYNTHÈSE DU DÉROULEMENT DES MESURES	106
<b>III.2 OUTILS ET METHODES POUR LES OBSERVATIONS AVEC UN DRONE DU TYPE AILE VOLANTE RGB .....</b>	<b>108</b>
III.2.1 PRINCIPE DE LA PHOTOGRAMMETRIE ASSISTEE PAR ORDINATEUR ET CHOIX	108
III.2.1.1 Notions essentielles.....	108
III.2.1.2 Choix du type de drone : l'eBee .....	109
III.2.2 ACQUISITION ET TRAITEMENT DES IMAGES	111
III.2.2.1 Traitement des données .....	111
III.2.3 SYNTHÈSE DES OBSERVATIONS EFFECTUEES SUR LE MASSIF DE LA CRISTALLERE	115
<b>III.3 SYNTHÈSE DE LA METHODOLOGIE .....</b>	<b>117</b>

<b>IV. RESULTATS ET DISCUSSION.....</b>	<b>119</b>
<b>IV.1 RESULTATS COMMENTES DE L'AUSCULTATION PAR SATELLITES : DGNSS (CONSTELLATIONS GPS &amp; GLONASS) .....</b>	<b>121</b>
IV.1.1 RESULTATS POUR LE RESEAU DE BASE (MASSIF DE LA CRISTALLERE A PETITE ECHELLE)	122
IV.1.1.1 Modèle n°1 : Résultats avec la méthode de positionnement multistations RGP.....	123
IV.1.1.2 Modèle n°2 : Résultats avec la méthode de positionnement statique pivot PR / Comparaison avec le modèle n°1.....	123
IV.1.1.3 Précisions altimétriques et planimétriques des points cibles RB du réseau de base : méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1) versus méthode de positionnement statique pivot PR (modèle n°2) .....	127
a) Commentaires sur les précisions altimétriques (dV) des points cibles RB .....	127
b) Commentaires sur les précisions planimétriques (dH) des points cibles RB.....	129
c) Commentaires des précisions altimétriques (dV) par rapport aux précisions planimétriques (dH) des points cibles RB .....	130
IV.1.1.4 Synthèse pour le réseau de base .....	132
a) Modèle n°1 (méthode de positionnement multistations RGP) versus modèle n°2 (méthode de positionnement statique pivot PR) .....	132
b) Evolution minimale averée du massif de la Cristallère.....	134
IV.1.2 RESULTATS POUR LE RESEAU DE DETAIL N°1 : LA PARTIE SOMMITALE DU DSL DE LA CRISTALLERE	135
IV.1.2.1 Modèle n°1A : Résultats avec la méthode de positionnement multistations RGP.	136
IV.1.2.2 Modèle n°2A : Résultats avec la méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR	138
IV.1.2.3 Précisions altimétriques et planimétriques des points cibles RDA du réseau de détail n°1 : méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1A) versus méthode de positionnement statique rapide pivot RB3-PR (modèle n°2A) .....	139

a)	Commentaires sur les précisions altimétriques (dV) des points cibles RDA.....	139
b)	Commentaires sur les précisions planimétriques (dH) des points cibles RDA.....	140
IV.1.2.4	Synthèse pour le réseau de détail n°1 : évolution minimale avérée du DSL de la Cristallère (partie sommitale) .....	141
IV.1.3	RESULTATS POUR LE RESEAU DE DETAIL N°2 : BOURRELET FRONTAL DU DSL DE LA CRISTALLERE	146
IV.1.3.1	Modèle n°1B : Résultats avec la méthode de positionnement multistations RGP..	147
a)	Partie haute du bourrelet frontal du DSL de la Cristallère (partie 1).....	147
b)	Partie basse du bourrelet frontal du DSL de la Cristallère (partie 2) .....	147
IV.1.3.2	Modèle n°2B : Résultats avec la méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR	147
a)	Partie haute du bourrelet frontal du DSL de la Cristallère (partie 1).....	147
a)	Partie basse du bourrelet frontal du DSL de la Cristallère (partie 2) .....	150
IV.1.3.3	Précisions altimétriques et planimétriques des points cibles RDB du réseau de détail n°2 (bourrelet frontal du DSL de la Cristallère) : méthode de positionnement multistations RGP (modèle n°1B) versus méthode de positionnement statique rapide pivot RB5-PR (modèle n°2B) .....	152
a)	Commentaires sur les précisions altimétriques (dV) des points cibles RDB du réseau de détail n°2 (bourrelet frontal du DSL de la Cristallère) .....	152
b)	Commentaires sur les précisions planimétriques (dH) des points cibles RDB du réseau de détail n°2 (bourrelet frontal du DSL de la Cristallère).....	153
IV.1.3.4	Synthèse pour le réseau de détail n°2 : évolution minimale avérée du DSL de la Cristallère (bourrelet frontal).....	155
<b>IV.2</b>	<b>RESULTATS COMMENTES DES OBSERVATIONS AERIENNES AVEC UN DRONE TYPE AILE VOLANTE RGB.....</b>	<b>163</b>
IV.2.1	CAMPAGNE AUTOMNE 2014 : LA PARTIE SOMMITALE DU DSL DE LA CRISTALLERE	164

IV.2.2	CAMPAGNE AUTOMNE 2015 : L'ENSEMBLE DU MASSIF DE LA CRISTALLERE	165
IV.2.3	CAMPAGNE PRINTEMPS 2016 : LA PENE DU THES ET LE PEILHOU	170
IV.2.3.1	Vol 1 : La pène du Thès (zone active du DSL de la Cristallère).....	170
IV.2.3.2	Vol 2 : la partie basse du glissement rocheux complexe du Peilhou .....	171
<b>IV.3</b>	<b>SYNTHESE GEOLOGIQUE ET STRUCTURALE DES DEFORMATIONS MESUREES DANS LE DSL DE LA CRISTALLERE .....</b>	<b>172</b>
<b>V.</b>	<b><u>CONCLUSION GENERALE.....</u></b>	<b>181</b>
	<b><u>REFERENCES .....</u></b>	<b>185</b>
	<b><u>ANNEXE. CARNET DE DONNEES : OBSERVATIONS ET MESURES DE SURFACE SATELLITAIRE DGNSS (CONSTELLATIONS GPS &amp; GLONASS) ....</u></b>	<b>207</b>
	Point de référence PR.....	209
	Point RB1 du réseau de base .....	211
	Point RB2 du réseau de base.....	213
	Point RB3 du réseau de base.....	215
	Point RB4 du réseau de base.....	217
	Point RB5 du réseau de base .....	219
	Point RB6 du réseau de base.....	221
	Point RDA1 du réseau de détail n°1 .....	223
	Point RDA2 du réseau de détail n°1 .....	225
	Point RDA3 du réseau de détail n°1 .....	227
	Point RDA4 du réseau de détail n°1 .....	229
	Point RDA5 du réseau de détail n°1 .....	231

Point RDA6 du réseau de détail n°1 .....	233
Point RDA7 du réseau de détail n°1 .....	235
Point RDA8 du réseau de détail n°1 .....	237
Point RDA9 du réseau de détail n°1 .....	239
Point RDA10 du réseau de détail n°1 .....	241
Point RDA11 du réseau de détail n°1 .....	243
Point RDA12 du réseau de détail n°1 .....	245
Point RDA13 du réseau de détail n°1 .....	247
Point RDA14 du réseau de détail n°1 .....	249
Point RDA15 du réseau de détail n°1 .....	251
Point RDA16 du réseau de détail n°1 .....	253
Point RDA17 du réseau de détail n°1 .....	255
Point RDA18 du réseau de détail n°1 .....	257
Point RDA19 du réseau de détail n°1 .....	259
Point RDA20 du réseau de détail n°1 .....	261
Point RDB1 du réseau de détail n°2 .....	263
Point RDB2 du réseau de détail n°2 .....	265
Point RDB3 du réseau de détail n°2 .....	267
Point RDB4 du réseau de détail n°2 .....	269
Point RDB5 du réseau de détail n°2 .....	271
Point RDB6 du réseau de détail n°2 .....	273

Point RDB7 du réseau de détail n°2 .....	275
Point RDB8 du réseau de détail n°2 .....	277
Point RDB9 du réseau de détail n°2.....	279
Point RDB10 du réseau de détail n°2.....	281
Point RDB11 du réseau de détail n°2 .....	283
Point RDB12 du réseau de détail n°2 .....	285
Point RDB13 du réseau de détail n°2 .....	287
Point RDB14 du réseau de détail n°2 .....	289
Point RDB15 du réseau de détail n°2 .....	291
Point RDB16 du réseau de détail n°2 .....	293
Point RDB17 du réseau de détail n°2 .....	295
Point RDB18 du réseau de détail n°2 .....	297
Point RDB19 du réseau de détail n°2 .....	299
Point RDB20 du réseau de détail n°2 .....	301
Point RDB21 du réseau de détail n°2 .....	303
Point RDB22 du réseau de détail n°2 .....	305
<b><u>LISTE DES FIGURES.....</u></b>	<b>307</b>
<b><u>LISTE DES TABLEAUX .....</u></b>	<b>327</b>
<b><u>TABLE DES MATIERES.....</u></b>	<b>339</b>





---

## Cartographie et évaluation de la dynamique à court terme d'instabilités gravitaires de grandes ampleurs

Exemple du massif de la Cristallère en haute Vallée d'Aspe (Pyrénées-Atlantiques, Nouvelle-Aquitaine, France)

### Apports des mesures par positionnement satellitaire et des observations aériennes par drone

Depuis ces dernières décennies, peu de sujets de la géologie de l'ingénieur ont attiré autant l'attention de la communauté scientifique que ceux traitant des risques naturels et plus particulièrement des instabilités gravitaires de grandes ampleurs reconnues sous les termes de DSGSD (Deep Seated Gravitational Slope Deformation) et de DSL (Deep Seated Landslide). Basée sur un nombre limité de cas d'étude à l'échelle naturelle (couplage datation et surveillance récente), la dynamique temporelle à court terme reste l'un de leurs aspects les moins étudiés aujourd'hui. Nous avons choisi l'exemple du massif de la Cristallère, situé en haute Vallée d'Aspe dans les Pyrénées béarnaises, où le DSL de la Cristallère a été récemment identifié et analysé à partir de deux méthodes de datation. Dans la continuité de ce travail, notre première approche consiste à évaluer la dynamique temporelle à court terme des mouvements de ce versant à différentes échelles et à partir de différentes méthodes de positionnement par satellites (constellations GPS et GLONASS) : positionnement multistations RGP (Réseau Géodésique Permanent), statique géodésique avec pivot et statique rapide avec pivot. Nous insistons dans ce travail, compte tenu des résultats originaux obtenus, sur l'intérêt du différentiel GNSS (Global Navigation Satellite System) avec un pivot qui se doit d'être proche géographiquement des observations à mener afin d'assurer une précision suffisante (de l'ordre du cm). Les observations et l'exploitation des modèles numériques de terrain issues des relevés aériens à différentes échelles obtenus avec un drone du type « aile volante » constituent la deuxième approche de ce travail de recherche. Elles viennent compléter la cartographie du site et démontrer l'existence d'un DSGSD à partir d'une caractérisation géomorphométrique haute résolution et haute précision (de l'ordre du cm également) ; elles permettent d'affiner la délimitation du DSL de la Cristallère et de sa zone la plus active (*Pène du Thès*) et du DSL du *Peilhau*. À ces deux approches complémentaires (combinaison de données tridimensionnelles ponctuelles et surfaciques), s'ajoutent préalablement un relevé de terrain géologique et géophysique (mesures structurales, tomographies de résistivités électriques et profils électromagnétiques Very Low Frequency) ainsi qu'une analyse des archives disponibles sur les ouvrages présents dans le versant instable, tels que la galerie drainante de la centrale hydroélectrique du *Baralet* et l'ancien tunnel ferroviaire du *Peilhau*. L'utilisation combinée de ces trois approches confirme que les mouvements profonds du massif de la Cristallère sont encore actifs avec un forçage sismique avéré : la prise de conscience du rôle que peut jouer le DSGSD est tout aussi fondamentale. Ainsi tous les ouvrages existants dans le massif, ou les projets d'aménagement ou de réhabilitation sur ce site doivent considérer l'existence d'une déstructuration, lente et progressive de l'ensemble du massif (DSGSD). Par ailleurs, la méthodologie développée dans ce travail se veut générale et peut être utilisée pour surveiller et suivre, à court et moyen terme, tous types de mouvement de terrain, et en particulier les glissements de terrain ou rocheux, profonds ou superficiels, lents ou rapides.

**Mots-clefs :** Géologie, DSGSD, Glissement rocheux profond, Différentiel GNSS, Drone, MNT

---

## Mapping and evaluation of the short term dynamics of large-scale gravitational instabilities

Example of the *Cristallère* massif in Upper Aspe Valley (*Pyrénées-Atlantiques, Nouvelle-Aquitaine* region, France)

### Contributions of satellite positioning measurements and aerial observations by drone

For these last decades, few subjects of the geology of the engineer have drawn the attention of the scientific community as much as those dealing of the natural hazards and more particularly with large-scale gravitational instabilities known as DSGSD (Deep Seated Gravitational Slope Deformation) and DSL (Deep Seated Landslide). Based on few cases study on a natural scale (dating and recent monitoring), short term temporal dynamics remains one of their least studied aspects today. We made the choice of the *Cristallère* massif as an example. It is located in Upper Aspe Valley of the Pyrenees (*Béarn* region). The *Cristallère* DSL was recently identified and analyzed through two dating methods. On the basis of this work, our first approach consists in assessing short term temporal dynamics of these slopes movements on various scales and with various methods of satellites positioning (GPS and GLONASS constellations): multistation positioning RGP (Permanent Geodetic Network in France), statics geodetic with pivot and fast static with pivot. We insist in this work, given the original results obtained, on the interest of the differential GNSS (Global Navigation Satellite System) with a pivot which must be geographically close to the observations to be carried out in order to ensure sufficient accuracy (cm). Observations and exploitation of drone digital elevation models of the site from aerial surveys at different scales obtained with a "flying wing" are the second approach to this research work. They complete the mapping of the site and demonstrate the existence of a DSGSD based on a high resolution and high precision geomorphometric characterization (cm); they make it possible to refine the delimitation of the *Cristallère* DSL and its most active area (*Pène du Thès*) and the *Peilhau* DSL. In addition to these two complementary approaches, a geological and geophysical survey (structural geology measurements, electrical resistivity tomographies and electromagnetic profiles Very Low Frequency surveys) and an analysis of the available data on the structures present in the unstable slope, such as the large diameter underground water pipe for the hydroelectric plant of *Baralet* and the former railway tunnel of *Peilhau*. The combined use of these three approaches confirms that the deep movements of the *Cristallère* massif are still active with proven seismic forcing: awareness of the potential role taken by the DSGSD is then fundamental. Thus, all the existing structures in the massif or the projects on this site (new constructions or rehabilitation of old structures) have to consider the existence of a slow and gradual change of the entire massif (DSGSD). Moreover, the methodology developed in this work is intended to be general. It also makes possible to monitor and follow, in the short and medium term, all types of ground movement, in particular landslides or rockslides, deep or superficial, slow or fast.

**Mots-clefs :** Geology, DSGSD, Deep Seated Landslide, Differential GNSS, UAV, DEM

---