



PHUSICOS

Basé sur la nature

Livrable D6.4

Formation technique pour les entreprises privées et les autorités publiques en vue de la mise en œuvre de la stratégie nationale de sécurité pour réduire les risques naturels dans les zones de montagne

WP 6 - L'innovation dans les arènes de l'apprentissage pour encourager l'échange de connaissances

Partenaire responsable du livrable :
CTP (Comunoté de Travaille des Pyrénées)

Révision : 1
niveau de diffusion : Public

avril 2023



Ce projet a reçu un financement du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne dans le cadre de l'accord de subvention n° 776681.

Toute diffusion des résultats doit indiquer qu'elle ne reflète que l'opinion de l'auteur et que l'Agence n'est pas responsable de l'usage qui peut être fait des informations qu'elle contient.

Le présent document n'a pas encore reçu l'approbation finale de la Commission européenne et peut faire l'objet de modifications.

Note sur les contributeurs

Chef de file responsable du produit à livrer :	CTP
Produit préparé par :	Didier Vergès
Partenaire responsable du contrôle de la qualité :	NGI
Document examiné par :	Anders Solheim
Autres contributeurs :	Eva García (CTP) ; Éric Leroi (R&D) ; Paola Sangalli (AEIP) ; Pilar Andrés (CREAF) ; Clara Lévy (BRGM) ; Xavier Carbonell (ARC Mediación Ambiental)

Informations sur le projet

Période du projet :	1er mai 2018 - 30 avril 2023
Durée (nombre de mois) :	60
Site web :	www.phusicos.eu
Coordinateur du projet :	Institut géotechnique norvégien (projet NGI n° 20180404)

Partenaires du projet :



Résumé

Ce livrable, D6.4 Formation technique pour les entreprises privées et les autorités publiques pour la mise en œuvre de la NBS afin de réduire les risques naturels dans les zones de montagne, est lié au WP6 et s'appuie sur la mise en œuvre de la NBS sur quatre sites, dans le cadre du site de démonstration à grande échelle des Pyrénées : Capet Forest, Artouste, Santa Elena et Erill la Vall.

L'objectif principal de ce rapport D6.4 est double. D'une part, le livrable décrit le contenu exposé lors d'un événement de deux jours organisé les 11 et 12 avril à Laruns, en France. Deuxièmement, il résume les réflexions soulevées lors de l'événement et propose des recommandations, ou encore des protocoles de suivi des sols, destinés aux politiques et aux techniciens en charge de la gestion des risques qui sont intéressés par la mise en place de NBS pour faire face aux risques naturels dans les zones montagneuses.

La mise en œuvre du NBS dans les Pyrénées a impliqué un large éventail de parties prenantes, publiques et privées. L'événement, axé sur la formation, la diffusion et la discussion des résultats de PHUSICOS dans les Pyrénées, a permis de rassembler un certain nombre de parties prenantes engagées dans les quatre sites pyrénéens, ainsi que des acteurs externes voisins. Les aspects techniques et le processus participatif ont été présentés et discutés afin de mettre en évidence les leçons clés à capitaliser et à partager, en tant que contribution à la reproduction de l'expérience PHUSICOS de mise en œuvre de NBS pour faire face aux risques naturels.

Le rapport comprend également en annexe l'ordre du jour et la liste des participants afin de se faire une idée globale du contenu de l'événement et de la variété des acteurs qui y ont participé.

Contenu

1	Introduction	10
1.1	Justification d'un événement final axé sur la formation et le partage d'expériences	10
1.2	Brève présentation du NBS développé par PHUSICOS dans les Pyrénées	12
1.2.1	Avalanches de neige à la forêt de Capet	12
1.2.2	Chute de pierres à Artouste	13
1.2.3	Pente instable du till à Santa Elena	14
1.2.4	Atténuation des coulées de débris à Erill-la-Vall	15
2	A propos de la bio-ingénierie	16
2.1	Bioingénierie : définition et approche	16
2.2	Techniques de bio-ingénierie	17
2.2.1	Techniques d'enduction	19
2.2.2	Techniques de stabilisation	19
2.2.3	Techniques mixtes	22
2.2.4	Techniques complémentaires	24
2.3	Quelques exemples pratiques de la Fédération européenne pour la bio-ingénierie des sols	25
3	Apprendre de PHUSICOS dans les Pyrénées	26
3.1	Travaux réalisés par PHUSICOS sur les sites pyrénéens et principaux enseignements tirés	27
3.1.1	Les risques naturels dans les Pyrénées et leurs spécificités	27
3.1.2	Sites d'étude dans les Pyrénées et principes de base de la NBS	28
3.1.3	Méthodologie et considérations relatives à la mise en œuvre des SNB pour la réduction des risques naturels	30
3.1.4	Résumé de l'expérience de la mise en œuvre des SNG sur les quatre sites pyrénéens en tant que contribution à l'apprentissage global des SNG pour la réduction des risques naturels dans les zones de montagne	38
3.1.5	La modélisation : intérêt et limites. Exemple de modélisation des éboulements sur le site d'Artouste	40
3.2	Tirer les leçons de l'expérience des laboratoires vivants dans les quatre sites du démonstrateur à grande échelle des Pyrénées	43
3.2.1	Approche développée lors des Living Labs dans les Pyrénées	43
3.2.2	Living Lab et autres activités de rencontre sur les sites pyrénéens	44
3.2.3	Enseignements tirés des activités du Living Lab sur les sites pyrénéens	52
3.3	Co-bénéfices de la NBS et de la surveillance des sols : recommandations pour les sites de Capet et de Santa Elena	53
3.3.1	Choix d'indicateurs appropriés pour les sols et les plantes	54
3.3.2	Indicateurs végétaux et pédologiques sélectionnés pour les sites de Capet Forest et de Santa Elena	57

3.3.3	Indicateurs relatifs aux plantes	58
3.3.4	Indicateurs de sol	65
3.3.5	Recommandations concernant la surveillance des sols sur les sites de Capet Forest et de Santa Elena	72
4	Recommandations pour la mise en œuvre des NBS	73
4.1	Destiné aux techniciens travaillant dans le domaine de la gestion des risques	73
4.2	Destiné aux responsables politiques en charge de la gestion des risques	76
5	Références	78
6	Annexes	81

Tableaux

Tableau -31. Considérations à chaque étape de la méthodologie pour la mise en œuvre des SNB pour la réduction des risques naturels. 33

Tableau -32. Principales activités pour la mise en œuvre de la NBS sur le site d'Artouste et intérêt particulier de chacune d'entre elles, évaluées sur une échelle de degré d'innovation. Ce tableau a été présenté le deuxième jour de l'événement pour alimenter la réflexion des autorités et des participants. 34

Tableau -33. Principales activités pour la mise en œuvre de la NBS sur le site de la forêt du Capet et intérêt particulier de chacune d'entre elles, évaluées sur une échelle de degré d'innovation. Ce tableau a été présenté le deuxième jour de l'événement pour alimenter la réflexion des autorités et des participants. 35

Tableau -34. Principales activités pour la mise en œuvre du NBS sur le site de Santa Elena. Ce tableau a été présenté le deuxième jour de l'événement pour alimenter les réflexions des autorités et des participants. 36

Tableau -35. Principales activités pour la mise en œuvre du NBS sur le site d'Erill la Vall et l'intérêt particulier de chacune d'entre elles. Ce tableau a été présenté le deuxième jour de l'événement pour alimenter les réflexions des autorités et des participants. 37

Tableau -36. Living Lab et autres activités de rencontre sur le site de la forêt du Capet, communes de Barèges et de Sers, Hautes-Pyrénées, France. 45

Tableau -37. Laboratoire vivant et autres activités de réunion sur le site de Santa Elena, municipalité de Biescas, Aragon, Espagne. 47

Tableau -38. Living Lab et autres activités de rencontre sur le site d'Artouste, municipalité de Laruns, Pyrénées-Atlantiques, France. 50

Tableau -39. Living Lab et autres activités de rencontre sur le site d'Erill la Vall, municipalité de Vall de Boí, Catalogne, Espagne. 52

Tableau -310. Liste des propriétés des sols et des plantes étudiées dans le cadre du projet PHUSICOS en vue d'une utilisation potentielle comme indicateurs de l'amélioration des services fournis par les sols et les plantes dans les études de cas de la coupe de Santa Elena et de la forêt de Capet. 57

Tableau -311. Indicateurs relatifs aux sols et aux plantes sélectionnés pour le suivi de l'effet des NBS mises en œuvre dans les cas d'étude de la forêt de Capet et de Santa Elena sur les services

écosystémiques des sols et des plantes (atténuation du changement climatique et maintien de la biodiversité). 58

Tableau -41. Liste des recommandations destinées aux techniciens lors de la définition et de la mise en œuvre des SNB pour la réduction des risques naturels. En gras, figurent les recommandations communes aux techniciens et aux politiques. 75

Tableau -42. Liste des recommandations destinées aux politiques lors de la définition et de la mise en œuvre des SNB pour la réduction des risques naturels. En gras, figurent les recommandations communes aux techniciens et aux politiques. 78

Chiffres

Figure -11 Affiche utilisée pour diffuser l'événement de deux jours, en français. 12

Figure -12. Affiche utilisée pour diffuser l'événement de deux jours, en espagnol. 12

Figure -13. Vue d'ensemble du site de la forêt de Capet. 13

Figure -14. Détail d'un trépied en bois, à côté d'un mur en maçonnerie, infrastructure grise. 13

Figure -15. Vue d'ensemble du site d'Artouste. 14

Figure -16. Détail sur un trépied en bois, en tant que mesure active. 14

Figure -17. Vue d'ensemble sur le site de Santa Elena, prise avec un drone, avec le mur en maçonnerie et les terrasses en bois à la fin des travaux. 15

Figure -18. Détail des gabions en bois pendant la construction. 15

Figure -19. Vue d'ensemble du site d'Erill la Vall avec les murs de krainers et les terrasses rocheuses au fond du ravin. 16

Figure -110. Détail d'un mur de krainers rempli de matériaux. 16

Figure -21. Technique d'enrobage : semis à la volée en structure. Florin Florineth (EFIB, Paola Sangalli). 19

Figure -22. Technique d'enrobage : hydroseeding (EFIB, Paola Sangalli). 19

Figure -23. Technique de revêtement : mise en place d'une couverture organique. Valentín Contreras (EFIB, Paola Sangalli). 19

Figure -24. Technique de stabilisation. Schéma des lits de branches (Sources : NTJ 12S) (EFIB, Paola Sangalli). 21

Figure -25. Technique de stabilisation. Photo de lits de branches (EFIB, Paola Sangalli). 21

Figure -26. Technique de stabilisation. Schéma des étapes en bois. (EFIB, Paola Sangalli). 21

Figure -27. Technique de stabilisation. Photo des marches en bois. (EFIB, Paola Sangalli). 21

Figure -28. Technique de stabilisation. Photos de tresses d'osier de Florin Florineth (EFIB, Paola Sangalli). 21

Figure -29. Schéma de la technique de stabilisation (Source : NTJ 12S) (EFIB, Paola Sangalli). 22

Figure -210. Technique de stabilisation. Construction en pente et en chevrons, à Bergara, Gipuzkoa (EFIB, Paola Sangalli). 22

Figure -211. Technique mixte. Schéma de la charpente en bois (EFIB, Paola Sangalli). 23

Figure -212. Technique mixte. Photo de l'armature en bois une fois végétalisée (EFIB, Paola Sangalli). 23

Figure -213. Technique mixte. Schéma de la section et de l'élévation d'un treillis (Source : Manual Regione Lazio) (EFIB, Paola Sangalli).	23
Figure -214. Technique mixte. Treillis à Leizaran et après un an (EFIB, Paola Sangalli).	23
Figure -215. Technique mixte. Schéma d'un brise-lames végétalisé (EFIB, Paola Sangalli).	23
Figure -216. Technique mixte. Photo d'un brise-lames revégétalisé (EFIB, Paola Sangalli).	23
Figure -217. Technique mixte. Schéma d'un gabion végétalisé (EFIB, Paola Sangalli).	24
Figure -218. Technique complémentaire. Barrages de torrent et rampe à poissons en pierre (EFIB, Paola Sangalli).	24
Figure -219. Exemple de restauration du couvert végétal dans les Pyrénées catalanes (Albert Sorolla, AEIP).	26
Figure -220. Exemple de stabilisation de pente fluviale dans une zone urbaine (Klaus Peklo, EFIB).	26
Figure -31. Localisation des sites pyrénéens du côté français et espagnol de la frontière (Source : interne avec image de Google Earth).	29
Figure -32. Illustrations de l'analyse de modélisation, de la conception théorique de la NBS, de la NBS mise en œuvre et des installations pour tester la NBS sur le site d'Artouste.	34
Figure -33. Illustrations du site de la forêt du Capet et de la NBS mise en œuvre par PHUSICOS (trépieds en bois et boisement). En bas à gauche de la figure, on peut voir des infrastructures grises sur la pente avec le village de Barèges en bas.	35
Figure -34. Illustrations de la mise en œuvre de la NBS sur le site de Santa Elena et du test de résistance de la structure en laboratoire.	36
Figure -35. Illustrations de la mise en œuvre de la NBS sur le site d'Erill la Vall et de la conception des murs en krainer.	37
Figure -36. Disposition des différents types de structures NBS (ronde).	41
Figure -37. Localisation des zones de dégagement des blocs (en rouge et noir) dans les zones Nord et Sud (source : BRGM).	42
Figure -38. Zone de travail dans la forêt de Capet. La zone de surveillance est entourée en blanc.	59
Figure -39. Zone de travail dans la tranchée de Santa Elena. La zone de surveillance comprend dix terrasses de 2 m de large de longueur décroissante (de 30 m pour le niveau le plus bas à environ 10 m pour le niveau supérieur).	60
Figure -310. Prélèvement d'échantillons de sol à l'aide de deux types de carottiers de section carrée (5 x 5 cm de côté) ou circulaire (5 cm de diamètre) de 15 cm de long. Les deux types de carottiers peuvent être ouverts dans le sens de la longueur pour obtenir des échantillons de sol non perturbés d'un volume constant connu.	67
Figure -311. Quelques exemples des divers morphotypes d'acariens du sol (dans le cercle ; D.E. Walter. https://beta.abmi.ca/biobrowser/species-group/mites-intro.html) et de collemboles (dans les rectangles ; Andy Murray, https://www.chaosofdelight.org)	69
Figure -312. Entonnoirs de Berlese utilisés pour extraire des microarthropodes d'échantillons de sol non perturbés. Source : http://soilbugs.massey.ac.nz/collection_berlese.php	69
Figure -313. Kit d'échantillonnage (cuillère et récipient stériles) pour les échantillons de sol destinés aux analyses de l'ADN microbien.	71

Figure -314. Caractérisation de la communauté microbienne du sol sous différentes communautés végétales dans les sites de Capet Forest (A) et de Santa Elena (B) pendant l'évaluation de la base de référence préopérationnelle.	72
Figure -61. Page 1 de l'agenda détaillé de l'événement de deux jours organisé en avril, 11 th et 12 th à Laruns (en français).	82
Figure -62. Page 2 de l'agenda détaillé de l'événement de deux jours organisé en avril, 11 th et 12 th à Laruns (en français).	83
Figure -63. Page 3 de l'agenda détaillé de l'événement de deux jours organisé en avril, 11 th et 12 th à Laruns (en français).	84
Figure -64. Page 4 de l'agenda détaillé de l'événement de deux jours organisé en avril, 11 th et 12 th à Laruns (en français).	85
Figure -65. Page 1 de l'agenda détaillé de l'événement de deux jours organisé en avril, 11 th et 12 th à Laruns (en espagnol).	86
Figure -66. Page 2 de l'agenda détaillé de l'événement de deux jours organisé en avril, 11 th et 12 th à Laruns (en espagnol).	87
Figure -67. Page 3 de l'agenda détaillé de l'événement de deux jours organisé en avril, 11 th et 12 th à Laruns (en espagnol).	88
Figure -68. Page 4 de l'agenda détaillé de l'événement de deux jours organisé en avril, 11 th et 12 th à Laruns (en espagnol).	89
Figure -69. Détail des participants lors de la première journée de l'événement (journée de formation, 11/04/2023).	91
Figure -610. Détail des participants au cours de la deuxième journée de l'événement (journée de séminaire sur les résultats, 12/04/2023).	92

Annexes

Annexe A	Agenda de l'événement de deux jours organisé les 11 et 12 avril à Laruns (en français et en espagnol).
Annexe B	Liste des participants.

1 Introduction

1.1 Justification d'un événement final axé sur la formation et le partage d'expériences

PHUSICOS a permis la mise en œuvre de solutions basées sur la nature pour réduire le risque posé par les événements météorologiques extrêmes dans les paysages ruraux de montagne sur quatre sites dans les Pyrénées, dans le cadre du site de démonstration à grande échelle des Pyrénées.

Tout au long de la mise en œuvre de ces solutions, le travail avec les partenaires et les parties prenantes a mis en lumière des difficultés et des leçons apprises que la Communauté de travail des Pyrénées (CTP ; *Comunidad de Trabajo de los Pirineos*) a souhaité mettre en évidence lors d'un événement (Figure 1-1 Affiche utilisée pour diffuser l'événement de deux jours, en français. et Figure 1-2. Affiche utilisée pour diffuser l'événement de deux jours, en espagnol. où ces enseignements pourraient être mis en commun et partagés avec les acteurs publics et privés du territoire. Ces difficultés comprennent les procédures administratives d'autorisation des travaux, les responsabilités légales des responsables des travaux, les problèmes liés à la définition des projets ou les difficultés liées aux capacités et aux connaissances des entreprises locales lorsqu'il s'agit de mettre en œuvre ce type de solution pour faire face aux risques naturels.

La CTP, en collaboration avec les partenaires PHUSICOS impliqués dans le site démonstrateur des Pyrénées, a organisé :

- Une journée de formation le 11 avril 2023, dont l'objectif est de présenter aux participants les principales techniques de génie biologique, particulièrement adaptées aux environnements de montagne.
- Un séminaire sur les résultats le 12 avril 2023, avec pour objectif de présenter les résultats obtenus par PHUSICOS et de discuter de la performance des solutions basées sur la nature face aux risques naturels dans les zones de montagne.

L'événement visait donc à renforcer l'engagement des autorités locales et des principales parties prenantes dans les solutions basées sur la nature (NBS) pour faire face aux risques naturels, à favoriser un espace d'échange libre entre pairs sur les défis, les réussites et les échecs dans le développement de NBS pour les risques naturels sur leurs territoires ou encore à enrichir et apprendre des échanges pour ensuite améliorer les progrès vers les normes et les réglementations.

Ces deux journées étaient principalement destinées aux autorités et techniciens des administrations publiques des forêts et des routes, aux petites et moyennes entreprises des secteurs du bois et de la construction, ainsi qu'aux bureaux d'études spécialisés dans les risques naturels, la géotechnique, etc.

Plus de 150 invitations ont été envoyées aux autorités et techniciens des communes voisines touchées par les risques naturels, aux chambres de commerce et d'industrie des Pyrénées, aux petites et moyennes entreprises des secteurs du bois et de la construction,

aux administrations municipales, départementales et régionales chargées de la gestion et de l'entretien des routes, aux sociétés de conseil et bureaux d'études, aux associations environnementales, aux centres de recherche, etc.

Vingt-six participants ont assisté à la journée de formation du 11 avril 2023, provenant d'administrations territoriales, d'entreprises et d'associations. Le 12 avril 2023, 32 personnes ont assisté au séminaire sur les résultats, les autres participants provenant principalement des autorités municipales.

Les principales présentations de l'événement ont été faites par des membres invités de la Fédération européenne de bio-ingénierie des sols (EFIB), EIFORSA, une entreprise spécialisée dans le secteur du bois, des experts techniques chargés de la définition des NBS dans chacun des quatre sites concernés par PHUSICOS (Alain Bruzy, Santiago Fábregas et Carles Raïmat), Santiago Fábregas et Carles Raïmat), l'expert en techniques participatives associé aux Living Labs de Santa Elena, Artouste et Erill la Vall (Xavier Carbonell) et les maires des villages des quatre sites (Robert Casadebaig, Pascal Arribet, Jean-Louis Noguère et Sònia Bruguera). En outre, trois partenaires de PHUSICOS, le Centre de recherche sur les applications écologiques et forestières (CREAF ; *Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales*), le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) et Risk & Development (R&D ; *Risques & Développement*) ont participé à l'événement et ont présenté leur travail sur le développement des NBS sur le site de démonstration des Pyrénées. La CTP a fait une présentation au nom de l'Université de Genève (UNIGE ; *Université de Genève*) et de l'International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), qui ont envoyé une présentation axée sur les obstacles aux NBS, en les comparant aux infrastructures grises et en examinant les perceptions des entrepreneurs privés.

Ce rapport, livrable 6.4, qui fait partie du work package 6 (WP6), est ensuite lié au WP2 - Sites d'études de cas : sites de démonstration à grande échelle et cas conceptuels de soutien, au WP3 - Innovation de service : participation des parties prenantes à travers les Living Labs et au WP5 - Innovation de gouvernance pour la conception et la mise en œuvre de solutions basées sur la nature. Ce livrable fournit une vue d'ensemble du contenu de la journée de formation et met en évidence les principaux résultats du séminaire de résultats, en proposant une série d'enseignements et de conclusions de cet événement de deux jours.



Figure 1-1 Affiche utilisée pour diffuser l'événement de deux jours, en français.



Figure 1-2. Affiche utilisée pour diffuser l'événement de deux jours, en espagnol.

1.2 Brève présentation du NBS développé par PHUSICOS dans les Pyrénées

1.2.1 Avalanches de neige à la forêt de Capet

Barèges et Sers sont deux villages situés au bas des pentes de la forêt domaniale du Capet, dans le département des Hautes-Pyrénées, dans les Pyrénées. Les deux villages ont une population permanente d'environ 300 personnes, qui double ou triple pendant les saisons d'été et d'hiver, en raison de l'attrait des sports d'hiver dans la vallée.

Le site est menacé par des avalanches de neige dans le couloir d'avalanche "Midaou". Les avalanches peuvent atteindre le village de Barèges, ce qui s'est produit à plusieurs reprises dans le passé, la dernière fois en 2013. La pente et la zone de déclenchement comportent de nombreux ouvrages de protection "gris" anciens, les premiers datant déjà du milieu des années 1800, constituant un véritable "musée des ouvrages de protection contre les avalanches". En raison de la direction des vents dominants, le manteau neigeux peut s'élever au-dessus des structures existantes d'environ 4 m de haut. En 2013, l'avalanche s'est d'abord déclenchée dans les 0,3 m de neige supérieure, dépassant une hauteur de neige de 4 m. Les mesures grises sont conçues pour protéger contre les avalanches avec une période de retour de 100 ans. Ces structures sont destinées à coexister avec les nouvelles solutions naturelles mises en œuvre par PHUSICOS.

Les solutions basées sur la nature développées par PHUSICOS depuis 2020 consistent en un boisement par plantation d'arbres de 9 espèces différentes (*Pinus uncinata*, *Larix decidua*, *Abies concolor*, *Picea engelmannii*, *Pinus cembra*, *Pinus ponderosa*, *Pinus bougetii*, *Pinus sylvestris*, *Cedrus deodora*), toutes prouvées comme étant les mieux adaptées au climat et à l'altitude (1800-2200 m asl.) du site. Les plantes sont protégées par 88 trépieds en bois nouvellement construits (Figure 1-3 et Figure 1-4), par les structures grises existantes ou par les groupes d'arbres naturels existants. Les trépieds en bois doivent également servir de structures de protection contre le déclenchement d'avalanches. Cette fonction est particulièrement importante dans les zones arides où la



Figure 1-3. Vue d'ensemble du site de la forêt de Capet.

végétation et les structures grises sont rares ou inexistantes.



Figure 1-4. Détail d'un trépied en bois, à côté d'un mur en maçonnerie, infrastructure grise.

1.2.2 Chute de pierres à Artouste

Le site est adjacent au barrage hydroélectrique d'Artouste, où la route RD-934 descend en virages serrés depuis la hauteur du niveau du réservoir jusqu'à la base du barrage. Le site est situé sur la commune de Laruns.

Le danger à Artouste (Figure 1-5) est dû à des chutes de pierres, provenant à la fois de corniches rocheuses exposées et de blocs détachés reposant sur la surface du till dans la pente raide. La pente est raide et les chutes de pierres touchent souvent la route et provoquent des situations dangereuses. En 2013, un accident mortel s'est produit lorsqu'une voiture a été frappée de plein fouet par un rocher. Cette route connaît un trafic intense et constitue un axe stratégique entre la France et l'Espagne. La densité moyenne du trafic à Artouste est supérieure à 1 000 000 de véhicules par an.

Les solutions basées sur la nature développées par PHUSICOS consistent en différentes structures faites de bois et/ou de pierres locales (Figure 1-6). Les solutions reposent sur des mesures actives (stabilisation manuelle et/ou structures en bois) pour stabiliser les zones sources et sur des mesures passives (structures mixtes en bois et/ou en pierre) pour ralentir et/ou dévier les rochers de leur trajectoire, renforçant ainsi le rôle protecteur de la forêt. En complément de l'intervention du NBS, des installations d'essai pour les

mesures NBS relatives aux chutes de pierres sont établies à La Peña Estación, en Espagne, dans les locaux de l'entreprise de bois, et sur un site à ciel ouvert, Gourzy, en France, dont les caractéristiques sont similaires à celles d'Artouste.



Figure 1-5. Vue d'ensemble du site d'Artouste.



Figure 1-6. Détail sur un trépied en bois, en tant que mesure active.

1.2.3 Pente instable du till à Santa Elena

Le versant de Santa Elena a été mis en évidence comme l'un des sites à haut risque le long de la route A-136, un axe majeur entre l'Espagne et la France (appelé RD-934 en France). Ce site est situé au cœur de la vallée pyrénéenne de Tena, qui attire le tourisme estival pour les randonnées et, en hiver, la station de ski de Formigal.

De nombreux incidents impliquant des rochers et/ou des débris sur la route se sont produits dans le passé le long de ce tronçon de l'A-136, mais peu d'accidents graves ont été signalés. Les vitesses y sont souvent élevées et la visibilité est faible en raison du terrain, de sorte qu'il y a peu de temps pour réagir si des obstacles tombent sur la route. La route reçoit un trafic intense et constitue un axe stratégique entre la France et l'Espagne ; la densité moyenne du trafic à Santa Elena est supérieure à 4 000 véhicules par jour.

Les mesures mises en œuvre par PHUSICOS à Santa Elena (Figure 1-7 et Figure 1-8) consistent en des terrasses formées par un mur de maçonnerie sèche de 5 m de haut à la base, suivi de 10 terrasses construites en rondins. Les constructions en rondins se présentent sous la forme de gabions en bois, remplis de sédiments locaux et surmontés d'une couche de 10 cm de sol organique pour la plantation de végétation arbustive sur les terrasses. Toutes les plantes utilisées sont locales et adaptées au climat, à l'altitude et à la géologie locale (till glaciaire) (*Pinus sylvestris*, *Betula pendula*, *Sorbus aria*, *Populus nigra*, *Salix capraea*, *Hippophae ramnoides* et *Salix eleagnos*). *Hippophae ramnoides* est un arbuste particulièrement recommandé pour stabiliser les pentes ; ses racines s'étendent rapidement et largement, permettant également la fixation d'azote non légumineux dans les sols environnants.



Figure 1-7. Vue d'ensemble du site de Santa Elena, prise avec un drone, avec le mur en maçonnerie et les terrasses en bois à la fin des travaux.



Figure 1-8. Détail des gabions en bois pendant la construction.

1.2.4 Atténuation des coulées de débris à Erill-la-Vall

Erill la Vall est un village de la vallée de Boí en Catalogne, situé au fond d'un ravin. Le problème du site d'Erill-la-Vall, en Catalogne (Espagne), est l'érosion et les coulées de débris provenant d'un complexe de till épais (>50 m) riche en blocs. De nombreuses petites ravines alimentent en débris le canal principal de la coulée de débris, qui peut finalement atteindre le village d'Erill-la-Vall. Ce village a déjà été touché par des laves torrentielles par le passé. Les fortes pluies déclenchent une réaction immédiate dans les sédiments de surface, avec l'érosion et le transport vers le bas des débris et des gros blocs, qui sont abondants dans le matériau de till. Cependant, un piézomètre situé à 30 m de profondeur dans un trou de forage derrière l'escarpement arrière montre une réponse aux fortes pluies après 10 à 15 jours, ce qui peut déclencher des événements plus importants et plus profonds. Un tel événement s'est produit en 1907 après une longue période de pluie. Les NBS sont principalement mis en œuvre pour atténuer les événements peu profonds.

Les mesures mises en œuvre par PHUSICOS (Figure 1-9 et Figure 1-10) consistent en des terrasses construites avec des murs en pierres sèches et du bois. Elles sont construites dans les parties inférieures de la zone la plus escarpée des deux principaux ravins. Les terrasses doivent être recouvertes de terre organique et plantées de végétation locale : herbe, buissons et arbres. La terre et le gazon de la région sont utilisés, et les engrais naturels provenant des animaux de pâturage locaux sont utilisés sur les terrasses. Environ 2 500 plantes seront utilisées, toutes des espèces locales (*Betula pendula*, *Salix purpurea*, *Salix caprea*, *Rhamnus alpina*, *Viburnum opulus*, *Corylus avellana*, *Prunus spinosa*, *Fraxinus excelsior* et *Salix sp.*).



Figure 1-9. Vue d'ensemble du site d'Erill la Vall avec les murs en krainer et les terrasses rocheuses au fond du ravin.



Figure 1-10. Détail d'un mur en krainer rempli de matériaux.

2 À propos de la bio-ingénierie

La première journée de l'événement a permis de présenter les principaux risques présents dans les Pyrénées et le concept de solutions basées sur la nature, puis de se concentrer sur les spécificités de la gestion forestière dans les vallées d'Ossau et d'Aspe. Le reste de la journée a été consacré à la compréhension des bases de la bio-ingénierie et de ses principales techniques. Un exercice pratique a été réalisé avec des pièces à l'échelle 1:20 afin que les participants puissent pratiquer et visualiser ces techniques et leurs effets. Cette partie sur la bio-ingénierie a été présentée par la Fédération européenne pour le génie biologique (EFIB) et ses membres invités. Le chapitre 2 passe en revue le contenu qui a été présenté aux participants, et l'ordre du jour complet de l'événement de deux jours est ajouté à ce rapport en tant qu'annexe.

2.1 Bioingénierie : définition et approche

La conservation des ressources naturelles nécessite l'adoption de mesures correctives ou réparatrices visant à prévenir les impacts négatifs ou à minimiser leurs effets sur l'environnement naturel.

Par conséquent, tout programme de restauration, de réhabilitation ou de régénération de l'environnement doit permettre de reconstituer le potentiel biologique des zones affectées afin que leur réutilisation à d'autres fins ou leur intégration dans le paysage soit viable.

La Society for Ecological Restoration (SER) définit cette activité comme le "processus visant à recouvrer l'intégrité écologique de l'environnement, sur la base de la variabilité de ces zones, en termes de biodiversité et de processus et fonctions écologiques, dans un contexte régional historique, dans lequel les utilisations traditionnelles durables sont également prises en compte".

Le génie biologique, la bio-ingénierie ou l'ingénierie du paysage peuvent être considérés comme des disciplines constructives qui poursuivent des objectifs techniques, écologiques, esthétiques et économiques, en utilisant principalement des matériaux vivants tels que des graines, des plantes, des parties de plantes et des communautés végétales, seuls ou en combinaison avec des matériaux inertes tels que la pierre, la terre, le bois, le fer ou l'acier en tant qu'éléments constructifs. Ces objectifs sont atteints en tirant parti des multiples fonctions des plantes et en utilisant des techniques de construction ayant un faible impact sur l'environnement.

Le génie biologique trouve son origine dans la combinaison de techniques forestières et de techniques d'ingénierie traditionnelles ; il a été développé principalement en Europe centrale : Autriche, Suisse, Allemagne et, dans une moindre mesure, Italie et France, des pays qui, faisant partie de l'Arc alpin, sont traditionnellement sensibles à la préservation de l'environnement naturel et tentent de régénérer les impacts produits par leurs grands projets, grâce à des techniques qui activent ou renforcent la régénération naturelle. Il ne s'agit pas d'une discipline qui remplace l'ingénierie classique, mais elle doit néanmoins être considérée comme un élément nécessaire et complémentaire des travaux d'ingénierie conventionnels.

Aujourd'hui, avec l'évolution des modèles économiques et une plus grande sensibilité aux questions environnementales et, en général, à la qualité de la vie, la bio-ingénierie présente un grand potentiel d'intervention dans le paysage et la défense de l'environnement. Les principaux domaines d'action sont les suivants :

- Reconstruction des zones humides, des zones côtières, des berges et des réservoirs.
- Interventions dans les zones montagneuses, principalement dans la récupération des glissements de terrain, la stabilité des pentes et les pistes de ski.
- Récupération de travaux publics, d'autoroutes, de gazoducs et de lignes de chemin de fer.
- Renaturation de mines, de carrières, de décharges et de sites d'enfouissement.

2.2 Techniques de bio-ingénierie

Le génie biologique comprend une série de techniques qui utilisent du matériel végétal vivant comme élément de construction, seul ou combiné à des matériaux inertes, dans le domaine de la restauration de l'environnement. Le génie biologique ou bio-ingénierie est utilisé dans tous les domaines des travaux de génie civil, en particulier dans le domaine de la consolidation des pentes et des berges et du contrôle de l'érosion.

Les techniques de bio-ingénierie ont plusieurs fonctions (Begemann *et al.*, 1994) : techniques, écologiques, paysagères et économiques.

Fonctions techniques

Ces techniques se réfèrent à la protection et à la stabilisation du sol par le système racinaire. Il s'agit de la protection de la surface du sol contre l'érosion due au vent, aux

précipitations, à la glace et à l'écoulement de l'eau ; de la protection contre les chutes de pierres ; de la stabilisation en profondeur du sol ; de l'élimination et de l'absorption des forces mécaniques nuisibles ; de la réduction de la vitesse des courants sur les rives ; de l'agrégation et de la stabilisation superficielle et/ou en profondeur du sol ; du drainage ; de la protection contre le vent ; de la favorisation de l'accumulation de neige, de sable et d'entraînement de matériaux ; de l'augmentation de la rugosité du terrain, ce qui crée une défense contre les avalanches.

Fonctions écologiques

En introduisant de la végétation, la bio-ingénierie modifie les caractéristiques écologiques de la zone d'intervention. Les techniques de bio-ingénierie offrent des résultats tels que : l'amélioration du bilan hydrique par l'augmentation de l'interception et donc de la capacité de rétention d'eau du sol et de la consommation d'eau par les plantes ; le développement d'associations végétales plus stables dans la série végétale de la zone, en particulier l'utilisation d'espèces indigènes qui contribuent à accélérer la récupération de l'écosystème d'origine ; le drainage du sol ; la protection contre le vent ; protection contre les immissions ; désagrégation mécanique du sol par les racines des plantes ; compensation des conditions de température dans la zone subaérienne et dans le sol ; ombrage ; amélioration de la quantité de nutriments dans le sol et, par conséquent, augmentation de la fertilité des sols pauvres ; protection contre le bruit ; augmentation de la productivité dans les zones agricoles voisines.

Fonctions du paysage

Elles visent à améliorer le paysage, par exemple : restauration des cicatrices dans le paysage ; intégration des ouvrages et des constructions dans le paysage ; écrans visuels pour cacher les infrastructures ayant un fort impact visuel ; enrichissement des paysages par la création de points focaux visuels et de nouvelles structures, formes et couleurs dans la végétation.

Fonctions économiques

Les travaux de bio-ingénierie ne sont pas toujours moins chers que les travaux d'ingénierie classique. Toutefois, si l'on tient compte de la durabilité de ces ouvrages, y compris des tâches d'entretien, les ouvrages de bio-ingénierie sont généralement plus économiques. Les ouvrages de bio-ingénierie sont des systèmes vivants basés sur la succession naturelle, c'est-à-dire qu'ils restent en équilibre grâce à une autorégulation dynamique sans avoir besoin d'un apport d'énergie artificielle. En choisissant les bonnes techniques ainsi que des matériaux vivants et inertes, il est possible d'obtenir une persistance extraordinaire avec de faibles coûts d'entretien.

Les techniques de bio-ingénierie peuvent être classées en quatre grands groupes :

1. Techniques de revêtement.
2. Techniques de stabilisation.
3. Techniques mixtes.
4. Techniques complémentaires.

2.2.1 Techniques de revêtement

Il s'agit de techniques destinées à prévenir l'érosion de surface (Figure 2-1 et Figure 2-2 et Figure 2-3). Au sein de ce groupe, on peut distinguer les sous-techniques suivantes :

- Semis de différents types, avec ou sans paillis
- Ensemencement hydraulique, espèces herbacées et ligneuses
- Utilisation de couvertures organiques dans les semis
- Transfert de gazon ou de fragments de plantes : principalement des rhizomes et des stolons
- Couverture avec des bâtons de salicacées.
- Semis à la volée.



Figure 2-1. Technique d'enrobage : semis à la volée en structure. Florin Florineth (EFIB, Paola Sangalli).



Figure 2-2. Technique d'enrobage : hydroseeding (EFIB, Paola Sangalli).



Figure 2-3. Technique d'enduction : mise en place d'une couverture organique. Valentín Contreras (EFIB, Paola Sangalli).

2.2.2 Techniques de stabilisation

Ces techniques permettent de stabiliser le sol jusqu'à 2 mètres de profondeur et sont basées sur la disposition de plantes ligneuses obtenues par reproduction végétative et placées en rangées horizontales (Figure 2-4, Figure 2-5, Figure 2-6, Figure 2-7, Figure 2-8, Figure 2-9 et Figure 2-10).

Les plantes doivent avoir la capacité de développer des racines adventives afin de former une charpente permettant de maintenir le sol en place.

Ces techniques sont les suivantes

- Piquets de saule
- Parterres de brindilles ou tremplins de bois de chauffage, dans des sols peu cohésifs
- Succession de piquets et de clôtures
- Tresses en osier
- Fascines bancaires

- Fascines de drainage
- Tapis de branches
- Palisades.

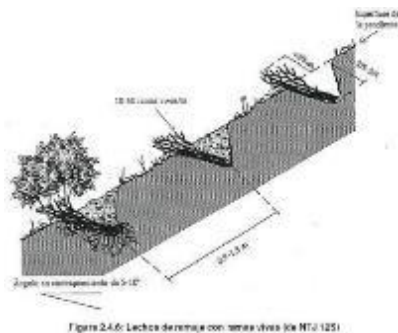


Figure 2-4. Technique de stabilisation. Schéma de massifs (Sources : NTJ 12S) (EFIB, Paola Sangalli).



Figure 2-5. Technique de stabilisation. Photo de lits de branches (EFIB, Paola Sangalli).

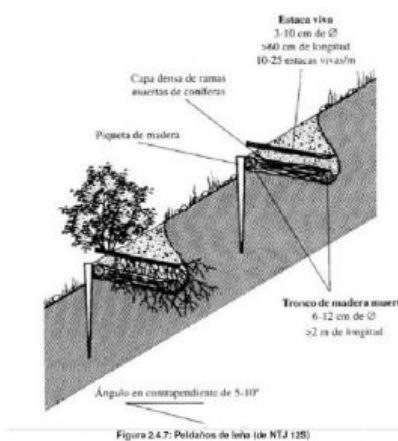


Figure 2-6. Technique de stabilisation. Schéma des marches en bois. (EFIB, Paola Sangalli).



Figure 2-7. Technique de stabilisation. Photo des marches en bois. (EFIB, Paola Sangalli).



Figure 2-8. Technique de stabilisation. Photos de tresses d'osier de Florin Florineth (EFIB, Paola Sangalli).

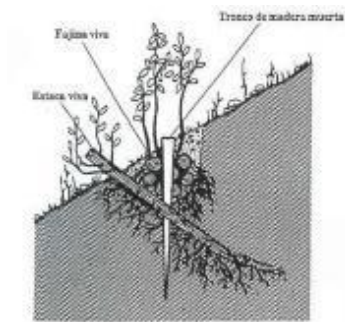


Figure 2-9. Schéma de la technique de stabilisation (Source : NTJ 12S) (EFIB, Paola Sangalli).



Figure 2-10. Technique de stabilisation. Construction en pente et en chevrons, à Bergara, Gipuzkoa (EFIB, Paola Sangalli).

2.2.3 Techniques mixtes

Ces techniques, contrairement à celles mentionnées ci-dessus, combinent l'utilisation d'éléments végétaux avec des matériaux tels que le bois, l'acier galvanisé, la pierre, le béton, etc. Dans ces techniques, le matériau inerte joue le rôle de stabilisateur jusqu'à ce que les plantes soient en mesure de remplir cette fonction (Figure 2-11, Figure 2-12, Figure 2-13, Figure 2-14, Figure 2-15, Figure 2-16 et Figure 2-17). Ces techniques sont les suivantes :

- Cadre en bois
- Marches en bois
- Treillis vivants
- Murs en terre renforcée ou murs verts
- Maillages tridimensionnels, géocellules, etc.
- Gabions/brise-lames végétalisés.

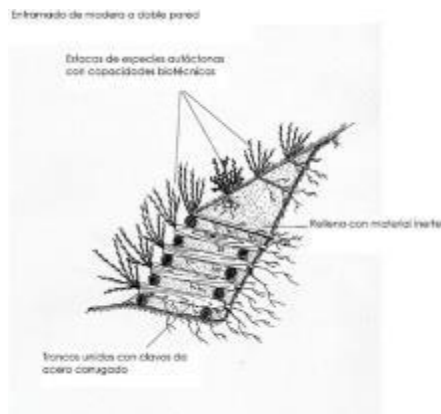


Figure 2-11. Technique mixte. Schéma de l'ossature bois (EFIB, Paola Sangalli).



Figure 2-12. Technique mixte. Photo de l'armature en bois autrefois végétalisée (EFIB, Paola Sangalli).

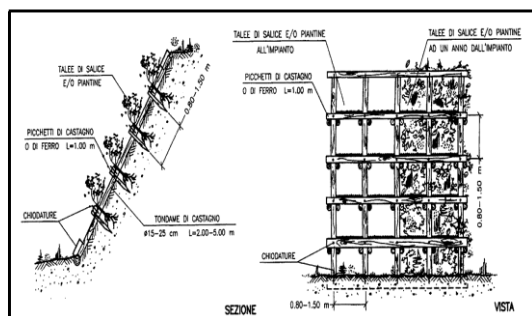


Figure 2-13. Technique mixte. Schéma de la section et de l'élévation d'un treillis (Source : Manual Regione Lazio) (EFIB, Paola Sangalli).



Figure 2-14. Technique mixte. Treillis à Leizaran et après un an (EFIB, Paola Sangalli).

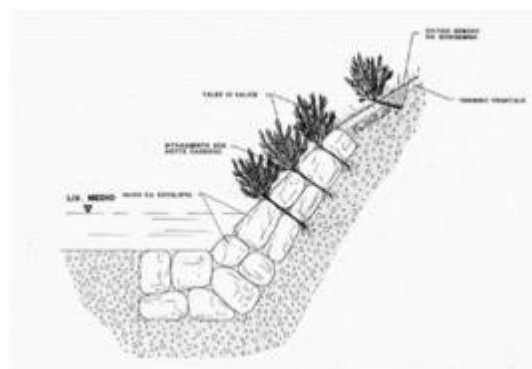


Figure 2-15. Technique mixte. Schéma d'un brise-lames végétalisé (EFIB, Paola Sangalli).



Figure 2-16. Technique mixte. Photo d'un brise-lames revégétalisé (EFIB, Paola Sangalli).

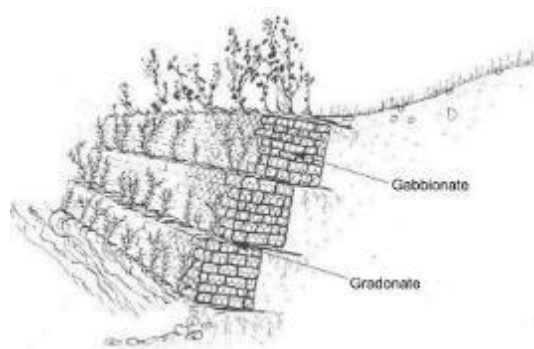


Figure 2-17. Technique mixte. Schéma d'un gabion végétalisé (EFIB, Paola Sangalli).

2.2.4 Techniques complémentaires

Outre les techniques de construction proprement dites, d'autres techniques doivent être utilisées pour compléter les précédentes, bien qu'elles n'aient pas pour but de stabiliser ou de protéger contre l'érosion (Figure 2-18). Il s'agit par exemple de la plantation d'espèces ligneuses pour accélérer le développement de la végétation, de la création de barrières antibruit, de drainage, de rampes à poissons, etc.

La combinaison d'une ou plusieurs techniques permet d'obtenir des résultats qui allient les aspects techniques de la stabilisation à ceux de l'aménagement paysager et de l'écologie.

Ces techniques comprennent, par exemple

- Rampes en pierre : remplacent les roues à aubes
- Barrages en bois et en pierre : éléments transversaux dans le lit de la rivière qui ralentissent la vitesse de l'eau.
- Déflecteurs : structures longitudinales qui dirigent le flux d'eau.



Figure 2-18. Technique complémentaire. Barrages de torrent et rampe à poissons en pierre (EFIB, Paola Sangalli).

Ces techniques présentent une série de limitations qui conditionnent leur exécution et qui doivent être prises en compte :

- **Saisonnalité.** Les travaux doivent être réalisés lorsque le matériel végétal se trouve à un stade végétatif approprié et lorsque les caractéristiques climatiques locales sont favorables à un enracinement adéquat de la végétation. Dans le cas de l'utilisation de piquets de saule, la période d'intervention se situe pendant le repos végétatif, c'est-à-dire de novembre à février (dans les Pyrénées), tandis que pour l'ensemencement hydraulique, la période la plus favorable est le printemps.
- **Entretien.** Les interventions n'ayant pas d'effet immédiat, les contrôles et l'entretien doivent être effectués après l'intervention : éclaircissement, replantation, remplacement des plantes, fertilisation, taille, etc.
- **Personnel formé.** Étant donné qu'il s'agit de techniques récentes et qu'elles doivent être appliquées en même temps que d'autres techniques de construction, le manque de personnel formé à leur utilisation constitue une limitation majeure. D'où l'importance de réaliser des formations théoriques et pratiques.
- **Obtention du matériel végétal à utiliser.** Souvent, les semences des espèces et des variétés les plus adaptées à l'intervention ne sont pas disponibles sur le marché, de sorte que l'on utilise des mélanges de semences standard, qui ne sont pas toujours les plus appropriés. En ce qui concerne l'acquisition de saules, il est souvent nécessaire d'obtenir l'autorisation des autorités compétentes pour les obtenir.
- **Conditions de sécurité.** Ces techniques ne peuvent remplacer les techniques traditionnelles que lorsque les conditions d'environnement et de sécurité garantissent leur bon fonctionnement. Dans les autres cas, notamment pour des raisons touchant à la vie et à la santé, il est préférable de recourir aux techniques d'ingénierie classiques.

2.3 Quelques exemples pratiques de la Fédération européenne pour la bio-ingénierie des sols

Les membres invités de la Fédération européenne pour le génie biologique (EFIB), Albert Sorolla et Klaus Peklo, ont présenté des exemples pratiques d'applications du génie biologique au cours de la journée de formation. Ces techniques visaient à stabiliser les pentes dans des contextes ruraux et urbains.

Albert Sorolla, de l'Association *espagnole d'ingénierie du paysage* (AEIP ; *Asociación Española de Ingeniería del Paisaje*), a présenté des exemples d'interventions réalisées dans les Pyrénées catalanes, principalement axées sur la stabilité des pentes et la restauration du couvert végétal (Figure 2-19). D'autres exemples concernaient la restauration des berges des rivières. À partir de son expérience, Albert Sorolla (AEIP) a indiqué les principaux avantages et les possibilités offertes par ces techniques par rapport aux techniques traditionnelles. Il a présenté un certain nombre d'exemples tirés de ses vingt-cinq années d'expérience dans ce domaine.



Figure 2-19. Exemple de restauration du couvert végétal dans les Pyrénées catalanes (Albert Sorolla, AEIP).

Klaus Peklo, de la Fédération européenne pour le génie biologique (EFIB), a présenté ses travaux, principalement axés sur le domaine fluvial (Figure 2-20). Dans de nombreux cas, les solutions sont mixtes, combinant l'utilisation de techniques de génie biologique avec des techniques d'ingénierie traditionnelles. Klaus Peklo a présenté des interventions situées dans les cours moyens et inférieurs des rivières descendant des Pyrénées, où les inondations ont causé des problèmes dans les zones urbaines.



Figure 2-20. Exemple de stabilisation de pente fluviale dans une zone urbaine (Klaus Peklo, EFIB).

3 Apprendre de PHUSICOS dans les Pyrénées

Ce chapitre 3 reprend les éléments présentés le deuxième jour de l'événement lors du séminaire sur les résultats, visant à soutenir les réflexions sur les aspects techniques de la mise en œuvre des SNG pour faire face aux risques naturels (sous-chapitre 3.1) ainsi que sur le processus participatif qui a accompagné la mise en œuvre des NBS sur les quatre sites pyrénéens (sous-chapitre 3.2).

3.1 Travaux réalisés par PHUSICOS sur les sites pyrénéens et principaux enseignements

Ce sous-chapitre reprend les éléments pour présenter le travail effectué par PHUSICOS sur les quatre sites pyrénéens afin de poser les bases d'une réflexion plus poussée sur l'application des NBS dans la gestion des risques naturels (sous-chapitres 3.1.1, 3.1.2 et 3.1.3). Ces éléments et les discussions qui ont eu lieu avec les autorités et l'ensemble des participants sont résumés dans le sous-chapitre **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Par ailleurs, le BRGM a présenté ses travaux de modélisation des éboulements réalisés à Artouste afin de démontrer la technologie utilisée et les principaux résultats de ces travaux (sous-chapitre **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

3.1.1 Les risques naturels dans les Pyrénées et leurs spécificités

Les zones de montagne, et en particulier les Pyrénées, sont des territoires spécifiques qui combinent une grande diversité d'événements défavorables, de mouvements de terrain (des éboulements aux grands glissements de terrain), de tremblements de terre, d'avalanches, de crues torrentielles, de tempêtes, ainsi que la petite taille des zones développées. Les zones urbaines sont limitées en taille et les réseaux routiers présentent de fortes vulnérabilités systémiques car les alternatives offertes sont peu nombreuses.

Compte tenu de ces deux caractéristiques, les risques sont souvent élevés et leur gestion peut être complexe et coûteuse. Une autre caractéristique importante des territoires de montagne réside dans l'importance des sites exposés à plusieurs aléas et dans le pourcentage de zones exposées. La prévalence et l'importance des risques en montagne posent donc la question cruciale de la hiérarchisation des zones à protéger et des solutions à apporter en termes de réduction des risques et d'aménagement du territoire. Cette hiérarchisation est inévitable pour deux raisons : financière et technique. Quand bien même les capacités techniques permettraient de tout protéger aujourd'hui, les moyens financiers à mobiliser -notamment les fonds publics- seraient disproportionnés par rapport aux enjeux. La deuxième raison est technique. Malgré les capacités technologiques actuelles, il n'est pas possible de protéger tous les territoires. De plus, la demande politique de prévention des risques est relativement récente, face aux processus de développement et d'urbanisation.

Ainsi, plusieurs questions fondamentales se posent en termes de gestion et de réduction des risques, notamment dans les zones montagneuses et en particulier dans les Pyrénées :

- **Quel niveau de risque peut-on accepter au niveau territorial ?** Cette question est importante et soulève le problème crucial du "niveau de risque acceptable". Elle est d'autant plus importante que la réponse à cette question conditionne les solutions techniques à mettre en œuvre et les moyens financiers à mobiliser.
- En corollaire à cette première question, se pose celle **de la hiérarchisation des zones à protéger et des solutions à apporter**, sachant que l'on ne peut pas tout protéger.

- En corollaire à ces deux premières questions, se pose également la question de la responsabilité des maires sur leurs territoires respectifs. **Comment limiter la responsabilité des maires et les aider dans la gestion raisonnable, équilibrée et durable de leur territoire ? Comment les aider à faire face aux demandes souvent paradoxales de leurs administrés, qui veulent être protégés et vivre librement sans contraintes excessives ?**
- Même si nous sommes en mesure de protéger certains secteurs, **comment trouver un équilibre raisonnable entre la protection des territoires et leur développement ?** Des équilibres "raisonnables" existent-ils toujours au regard des intérêts divergents et parfois opposés qui se manifestent sur les territoires ?
- **Comment proposer des solutions intégrées qui répondent à plusieurs enjeux concomitants de protection (approche multirisque) et de développement, afin d'optimiser les solutions et les investissements ?**
- **Comment définir des solutions optimales qui intègrent à la fois le changement climatique et la transformation territoriale ?**
- **Comment définir des solutions qui intègrent de manière équilibrée la protection de l'environnement et le développement territorial ?** Comment protéger sans "paralyser" les territoires ? Comment trouver un équilibre entre sanctuarisation et développement économique et social ?
- **Comment impliquer au mieux tous les acteurs du territoire, et en particulier la population résidente, avec de bonnes intentions mais aussi avec réalisme ?**

3.1.2 Sites d'étude dans les Pyrénées et principes de base de la NBS

Les quatre sites pyrénéens du projet PHUSICOS (Figure 3-1) ont abordé les risques suivants :

- Site de la forêt du Capet : avalanches de neige.
- Site d'Artouste : chutes de pierres.
- Site de Santa Elena : érosion et éboulements.
- Site d'Erill la Vall : érosion et coulées de débris.



Figure 3-1. Localisation des sites pyrénéens du côté français et espagnol de la frontière (Source : interne avec image de Google Earth).

L'objectif du projet PHUSICOS était de déterminer et de valider si les solutions basées sur la nature (NBS) pouvaient apporter des réponses efficaces et appropriées à la réduction des risques de catastrophes, en intégrant toutes les questions susmentionnées comme une alternative aux solutions d'ingénierie conventionnelles.

L'objectif était de concevoir et de mettre en œuvre des solutions :

- basé sur la nature
- efficace pour réduire les risques
- l'implication des acteurs locaux et régionaux
- promouvoir le développement économique local
- comme alternatives aux solutions "grises" de l'ingénierie classique.

Pour mener à bien ce projet sur chacun des quatre sites, une méthodologie globale et complète a été mise en place : contextes et risques variés appelant des solutions adaptées, engagement de multiples parties prenantes, réponses opérationnelles et pragmatiques allant au-delà des fondements théoriques. La définition de solutions pertinentes et adéquates devait intégrer les problématiques de gestion des risques (sous-chapitre 3.1.1), mais aussi comprendre pleinement le niveau de risque auquel les sites sont exposés. Une bonne prise de décision en matière de gestion équilibrée des risques nécessite à la fois une compréhension de toutes les composantes du risque et une connaissance approfondie du territoire et des aléas.

L'expérience PHUSICOS a mis en évidence la difficulté d'obtenir ou d'accéder aux données de base nécessaires à la connaissance approfondie des risques, à la caractérisation de chaque site et des aléas. Le traitement de ces données étant à la fois coûteux et long, ces contraintes ont conduit les acteurs à recourir à des techniques innovantes qui assurent la définition et la mise en œuvre de solutions opérationnelles et

garantissent la responsabilité des autorités en charge de la gestion des risques, au premier rang desquelles les maires.

Par ailleurs, la mise en œuvre opérationnelle des solutions fondées sur la nature, le retour d'expérience de PHUSICOS spécifique à la bio-ingénierie, ainsi que les réflexions partagées avec l'ensemble des parties prenantes ont conduit à remettre en cause la définition des solutions fondées sur la nature, selon l'UICN (sous-chapitre **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

3.1.3 Méthodologie et considérations relatives à la mise en œuvre des SNB pour la réduction des risques naturels

L'approche générale pour définir et dimensionner les solutions basées sur la nature pour réduire les risques naturels est basée sur les étapes suivantes :

1. Identification des risques naturels pris en compte
2. Évaluation des risques et hiérarchisation des domaines de risque
3. Détermination des zones géographiques où le NBS sera mis en œuvre et évaluations initiales
4. Conception et dimensionnement des NBS
5. Validation des NBS sélectionnés
6. Mise en œuvre opérationnelle des NBS sur le terrain
7. Retour d'information sur la mise en œuvre des NBS
8. Définition d'un cadre de gestion et de suivi pour les SNB
9. Définition d'un cadre de communication

Le tableau suivant (Tableau 3-1) décrit chacune des étapes :

Étapes	Considérations
1. Identification du type d'aléa naturel considéré	Dans PHUSICOS, quatre sites dans les Pyrénées ont été sélectionnés avec les risques suivants : ▪ Site de la forêt du Capet : avalanches de neige. ▪ Site d'Artouste : chutes de pierres. ▪ Site de Santa Elena : érosion et éboulements. ▪ Site d'Erill la Vall : érosion et coulées de débris.
2. L'évaluation des risques	Dans la mesure du possible, l'évaluation des risques doit être quantitative. Elle doit pouvoir définir, de manière quantifiée, les périodes de retour associées aux pertes potentielles. Ces pertes sont traditionnellement mesurées en termes de victimes humaines (décès, blessures), de dommages, de destruction, de perte de fonction ou d'activité, et/ou de pertes économiques, que ces pertes soient directes ou indirectes.

Étapes	Considérations
<u>2.1 Risques</u>	L'aléa vise à définir l'intensité des événements naturels pour des périodes de retour données. Il nécessite une compréhension des mécanismes physiques en jeu et la détermination des paramètres impliqués dans ces mécanismes.
2.1.1 Acquisition des données de base	L'acquisition de données de base est la clé d'une bonne quantification des risques. Il est donc nécessaire de disposer d'outils permettant l'acquisition rapide de données très précises à un coût raisonnable. Les collectivités ont des difficultés à investir dans des campagnes d'acquisition de données de référence, d'une part parce que le coût est élevé, mais aussi parce qu'elles manquent d'outils et de compétences pour stocker et partager l'information. La mise en place d'outils innovants d'acquisition, de remontée d'information et de partage efficace sont des priorités dans la gestion des risques et des territoires.
2.1.2 Modélisation	La modélisation des risques est une étape importante dans la prise de décision ; c'est un outil qui permet de simuler ce qui est susceptible de se produire sur le terrain et d'accéder à des paramètres pour la conception d'ouvrages de protection. Les modèles ne sont que des images partielles de la réalité et doivent être basés et calibrés sur des données fiables et exhaustives provenant de campagnes de terrain. Les techniciens et les scientifiques doivent être en mesure de communiquer clairement aux politiques les limites des modèles et les incertitudes qui y sont associées ; aussi, parce que la responsabilité des politiques est engagée. La modélisation est un atout majeur pour simuler différents scénarios. Au moins deux scénarios doivent être établis : un premier scénario pour évaluer le niveau de risque avant la mise en œuvre du NBS (évaluation initiale) et un second scénario intégrant le NBS. La différence entre les deux scénarios quantifiera la réduction du risque et déterminera le risque résiduel. Le NBS sera ainsi validé, en considérant que le risque résiduel est acceptable.
<u>2.2 Actifs et exposition</u>	L'analyse des biens et de leur exposition aux dangers, ainsi que la définition de leur vulnérabilité, définissent le risque. Dans de nombreux cas, ces deux composantes ne sont abordées que de manière très générale parce qu'elles ne sont pas affectées par les SNG. En d'autres termes, l'exposition et la vulnérabilité des actifs ne sont pas influencées par les SNG. Les variations du risque ne sont attribuables qu'aux variations des dangers sur lesquels les NBS ont un impact. L'inventaire et l'analyse des biens (exposition - probabilité de présence) permettent de hiérarchiser les zones à risque et de déterminer les zones où les SNB sont les plus appropriées. La nature et l'exposition des biens permettent de décider de l'acceptabilité du risque, de la nécessité de mettre en œuvre des solutions de réduction du risque et de l'utilité d'appliquer les NBS. Les données sur les actifs doivent être collectées et stockées au niveau des collectivités locales. C'est un domaine dans lequel de nombreuses collectivités locales échouent.
<u>2.3 Vulnérabilité</u>	L'évaluation de la vulnérabilité des biens fait appel à des données difficilement accessibles. L'analyse de la vulnérabilité (physique et systémique) ouvre un éventail d'actions possibles en termes de réduction des risques.
<u>2.4 Hiérarchisation des domaines de risque</u>	La hiérarchisation des zones à risque peut être basée soit sur les résultats de la modélisation, soit sur le retour d'expérience des dommages subis. Elle doit permettre de décider : ▪ Nécessité ou non de mettre en place des solutions de réduction des risques. ▪ Pertinence de l'utilisation des NBS.

Étapes	Considérations
3. Détermination des zones géographiques où les SNB seront mis en œuvre et premières évaluations	La détermination des domaines dans lesquels le NBS peut être mis en œuvre est basée sur : ▪ Priorité aux zones à risque (tout ne peut pas être protégé, en particulier dans les zones de montagne). ▪ Les ressources financières à mobiliser en fonction du niveau de risque. ▪ Les ressources financières disponibles. ▪ L'existence (ou non) d'un cadre réglementaire sur la nécessité de mettre en œuvre des actions. ▪ L'existence (ou non) d'un cadre normatif sur les solutions à mettre en place pour réduire voire supprimer la responsabilité des maires, autorités ou gestionnaires en cas de dommages. Il convient de mentionner que dans de nombreux cas, la notion de "raisonnablement nécessaire" n'est pas définie et qu'elle est souvent jugée <i>a posteriori</i>. L'opportunité et la pertinence de la mise en œuvre des NBS doivent s'inscrire dans une approche globale de la gestion de l'espace et dans une approche complémentaire avec les solutions grises, y compris la prise en compte des aspects temporels. Il peut être opportun de mettre en place un plan général de protection, structuré en phases géographiques et temporelles. Ce plan comprendra ▪ Identifier les zones où le NBS apportera des résultats significatifs (intensité des dangers et possibilités effectives de réduire la fréquence et/ou l'intensité des dangers). ▪ Identifier les types de NBS qui sont adaptés, en principe, au risque encouru. ▪ Définir un ensemble d'indicateurs de base qui seront contrôlés (réduction des risques ; faisabilité technique ; impact sur l'environnement et l'écosystème ; impact sur la société ; impact sur l'économie locale). ▪ Réalisation de l'évaluation initiale sur chaque site.
4. Conception et dimensionnement des NBS	Cette étape doit être menée dans le cadre d'échanges entre scientifiques, techniciens et communautés locales afin de mobiliser le potentiel de ressources et de compétences locales pour renforcer le développement économique local. Il est important d'utiliser des matériaux locaux pour la mise en œuvre des NBS, afin de réduire l'empreinte carbone du transport sur de longues distances. Ce sont les matériaux locaux qui doivent définir la conception et le dimensionnement des NBS, et non l'inverse. La conception et le dimensionnement des NBS est une tâche d'ingénierie et doit être réalisée par des structures aux compétences reconnues. Elles doivent non seulement s'appuyer sur un cadre théorique solide, mais aussi sur des essais en laboratoire ou sur site, des modèles réduits ou des prototypes à l'échelle réelle.
5. Validation des NBS	À ce jour, il n'existe pas de cadre normatif pour le développement et la mise en œuvre des NBS. La validation des solutions peut être théorique, par calcul, ou expérimentale. Cette validation doit être effectuée par des personnes et/ou des structures aux compétences reconnues.
6. Mise en œuvre opérationnelle des NBS sur le terrain	La mise en œuvre des NBS doit se faire dans le respect des spécifications techniques. Les pouvoirs adjudicateurs doivent s'efforcer de concevoir des spécifications "réalistes" qui tiennent compte des contraintes locales. De telles spécifications garantiront également que les entreprises ne seront pas dissuadées de soumissionner. Le maître d'ouvrage et le gestionnaire du projet doivent s'assurer - à un stade précoce - que les contraintes

Étapes	Considérations
	administratives sont levées. La mise en place de groupes de travail avec toutes les parties prenantes pourrait être utile pour éviter d'éventuels blocages. Les entreprises locales devraient être encouragées à répondre aux appels d'offres ou à rejoindre les groupes qui y répondent. Cela permettra non seulement de promouvoir le développement économique local, mais aussi, dans de nombreux cas, de faciliter les interventions d'entretien ultérieures.
7. Retour d'information sur la mise en œuvre des NBS	Il s'agit notamment de ▪ Effectuer un retour d'information complet sur la mise en œuvre des NBS (aspects techniques, financiers, administratifs et de planification) en impliquant toutes les parties prenantes. ▪ Identifier les écarts et les changements par rapport aux objectifs initiaux et mesurer (quantifier) les impacts. ▪ Rendre toutes les données acquises disponibles dans les outils existants des autorités locales et les plateformes NBS dédiées.
8. Définition d'un cadre de gestion et de suivi pour les SNB	Ce cadre de gestion et de suivi des SNB devra déterminer ▪ La fréquence et les modalités de suivi des travaux. ▪ Les critères et les modalités d'entretien des ouvrages. ▪ Les critères et les procédures pour le retrait des structures NBS si elles sont jugées inutiles ou déficientes, ou si elles sont susceptibles d'augmenter les risques ou de dégrader l'environnement. ▪ La définition des responsabilités et des obligations de chacune des parties prenantes (collectivités, organismes d'Etat, organismes publics, techniciens, entreprises). ▪ Mise à jour des indicateurs d'évaluation (réduction des risques ; faisabilité technique ; impact sur l'environnement et l'écosystème ; impact sur la société ; impact sur l'économie locale), définition des fréquences et des acteurs à mobiliser ainsi que des actions à entreprendre en cas d'évolution négative.
9. Définition d'un cadre de communication	Ce cadre de communication doit être mis en place dès le début de la mise en œuvre des NBS et est transversal à toutes les étapes ci-dessus. Il est nécessaire de faire comprendre à toutes les parties prenantes ce qui est en jeu avec les NBS, leurs intérêts, leurs limites et leurs contraintes. Il s'agit notamment d'expliquer les concepts de risque et l'équilibre à trouver entre la protection, le développement et les coûts. Tous les médias disponibles devraient être mobilisés pour promouvoir les NBS (documents, vidéos, sites web, applications, visites sur le terrain, ateliers, conférences, living labs, séminaires).

Tableau 3-1. Considérations à chaque étape de la méthodologie pour la mise en œuvre de la NBS pour la réduction des risques naturels.

Les tableaux et figures ci-dessous présentent les principaux résultats de la méthodologie générale appliquée à chacun des quatre sites :

- Artouste (Tableau 3-2 et Figure 3-2).
- Capet (Tableau 3-3 et Figure 3-3).

- Santa Elena (Tableau 3-4 et Figure 3-4).
- Erill la Vall (Tableau 3-5 et Figure 3-5).

Tâches / travail réalisé		Domaines					Intérêt particulier		Innovation	
		Données de base	Modélisation	Travaux	Surveillance	Gestion	Communication			
ARTOUSTE										
Capture d'écran										
• Lidar aérien		x						A1	Utilisé pour la modélisation des forêts et des chutes de blocs. Nouvelles méthodologies pour la spatialisation à l'échelle du versant des données de modélisations : types d'arbre, positions des arbres, diamètres des troncs, zones de départ, nature des sols et rugosité du sol	***
• Lidar terrestre <u>autoportable</u>		x						A2	Inventaire des arbres (localisation, diamètre)	***
• Dendrochronologie		x						A3	Modélisation chutes de blocs (hauteur max d'impact)	**
• Inventaires des zones instables		x						A4	Caractérisation précise des blocs instables	*
• Modélisation théorique des NBS			x					A5	Différentes configurations	***
• Site expérimental avec béliér			x					A6	Site unique pour l'expérimentation de la résistance des structures	***
• Site expérimental in situ			x					A7	Expérimentation de la résistance des structures et de la forêt	***
• Mise en place des NBS et déplacement de blocs				x				A8	Actif, passif – différents designs - exhaustif	**
• Modélisation de la forêt			x					A9	Méthodologie innovante	**
• Modélisation des chutes de blocs			x					A10	Méthodologie innovante (zones de départ)	*
• Living Lab (TUM)							x	A11	Interaction avec les élus	
• Mise en place d'un comité technique						x		A12	Phusicos – Parc – Municipalité de Laruns	
• Protocole de propriété, suivi, maintenance				x		x		A13	Phusicos – Parc – Municipalité de Laruns	
• Séminaire de restitution							x	A14	Technicien et décideurs	

Tableau 3-2. Principales activités pour la mise en œuvre de la NBS sur le site d'Artouste et intérêt particulier de chacune d'entre elles, évaluées sur une échelle de degré d'innovation. Ce tableau a été présenté le deuxième jour de l'événement pour alimenter la réflexion des autorités et des participants.

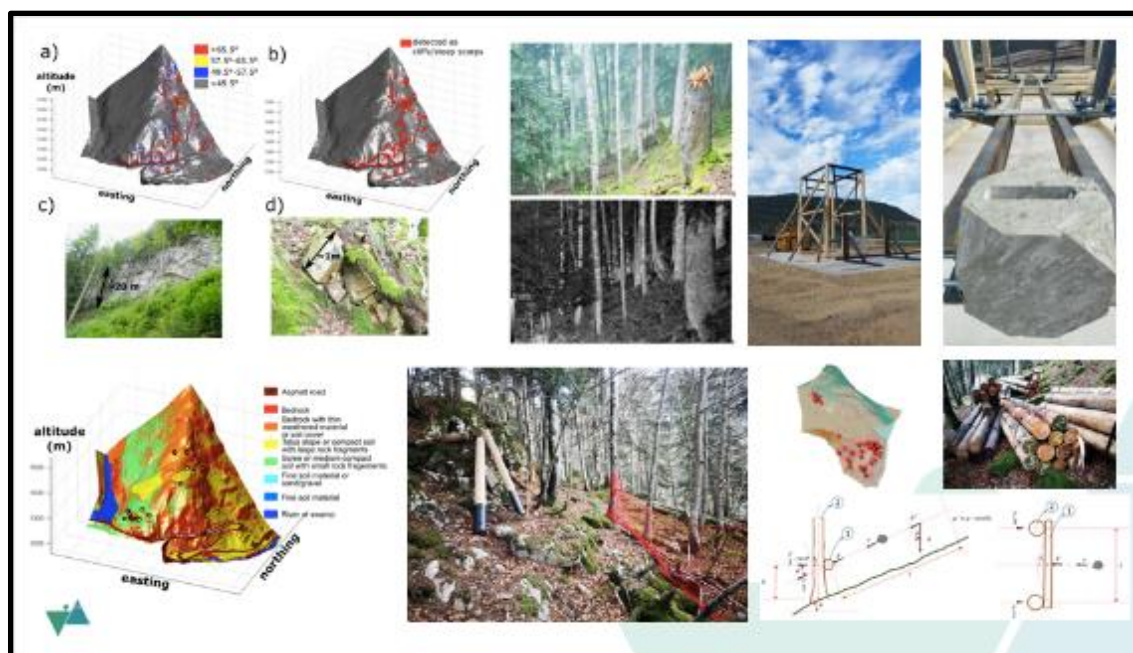


Figure 3-2. Illustrations de l'analyse de la modélisation, de la conception théorique de la NBS, de la NBS mise en œuvre et des installations pour tester la NBS sur le site d'Artouste.

Tâches / travail réalisé	Domaines					Intérêt particulier	
CAPET	Données de base	Modélisation	Travaux	Surveillance	Gestion	Communication	Innovations
• Lidar aérien estival (préalable au projet)	X					C1	Utilisé pour cartographie IMA, cartographie des ouvrages de génie civil existants et cartographie des zones à traiter dans le cadre du projet
• Calcul automatisé de l'Indice de Maîtrise de l'Aléa par la forêt (préalable au projet)	X	X				C2	Identification des secteurs où la forêt ne joue aucun rôle de stabilisation du manteau neigeux
• Analyse des essences adaptées et acceptables, en lien avec comité technique (PNP, CBNP, DSF, ONF)	X					X C3	Dans contexte de changement climatique et d'apparition de pathogènes, trouver des alternatives au pin à crochets
• Identification des zones à planter selon topographie, existence d'ouvrages de génie civil	X		X			C4	Identification des zones à planter avec ou sans tripodes
• Travail du sol pour planter en collectif			X			C5	Meilleure reprise
• Mise en place des tripodes			X			C6	Protection des plantations / bois local. Amélioration à court terme de la stabilisation du manteau neigeux, réduction des actions sur les ouvrages de génie civil
• Plantation des collectifs			X			C7	Amélioration à moyen terme de la stabilisation du manteau neigeux, réduction des actions sur les ouvrages de génie civil
• Living Lab						X C8	Réunion avec les élus, réunion publique
• LIDAR aérien hivernal	X					C9	Pour comparer avec LIDAR estival et mieux cerner les zones d'accumulation de neige -> zones à traiter pour risque de départ d'avalanche, mais plus défavorable pour la végétation

Tableau 3-3. Principales activités pour la mise en œuvre de la NBS sur le site de la forêt du Capet et intérêt particulier de chacune d'entre elles, évaluées sur une échelle de degré d'innovation. Ce tableau a été présenté le deuxième jour de l'événement pour alimenter la réflexion des autorités et des participants.



Figure 3-3. Illustrations du site de la forêt du Capet et du NBS mis en œuvre par PHUSICOS (tripodes en bois et boisement). En bas à gauche de la figure, on peut voir des infrastructures grises sur la pente avec le village de Barèges en bas.

Tâches / travail réalisé	Domaines					Intérêt particulier	Innovation
Capture d'écran SANTA ELENA	Données de base	Modélisation	Travaux	Surveillance	Gestion	Communication	
• Reference ancienne travaux RHF (=travaux RTM). Arratiecho.1904	X						51
• Modélisation des ouvrages		X					52
• Tests expérimentaux des ouvrages		X					53
• Mise en place d'une surveillance vidéo en continue				X			54
• Mise en place des terrasses			X				55
• Mise en place de végétation autochtone			X				56
• Visites étudiants					X		57
• Lidar terrestre fixe	X						58
• Comparaison évolution avec talus morainique proche sans traitement							59

Tableau 3-4. Principales activités pour la mise en œuvre du NBS sur le site de Santa Elena. Ce tableau a été présenté le deuxième jour de l'événement pour alimenter les réflexions des autorités et des participants.

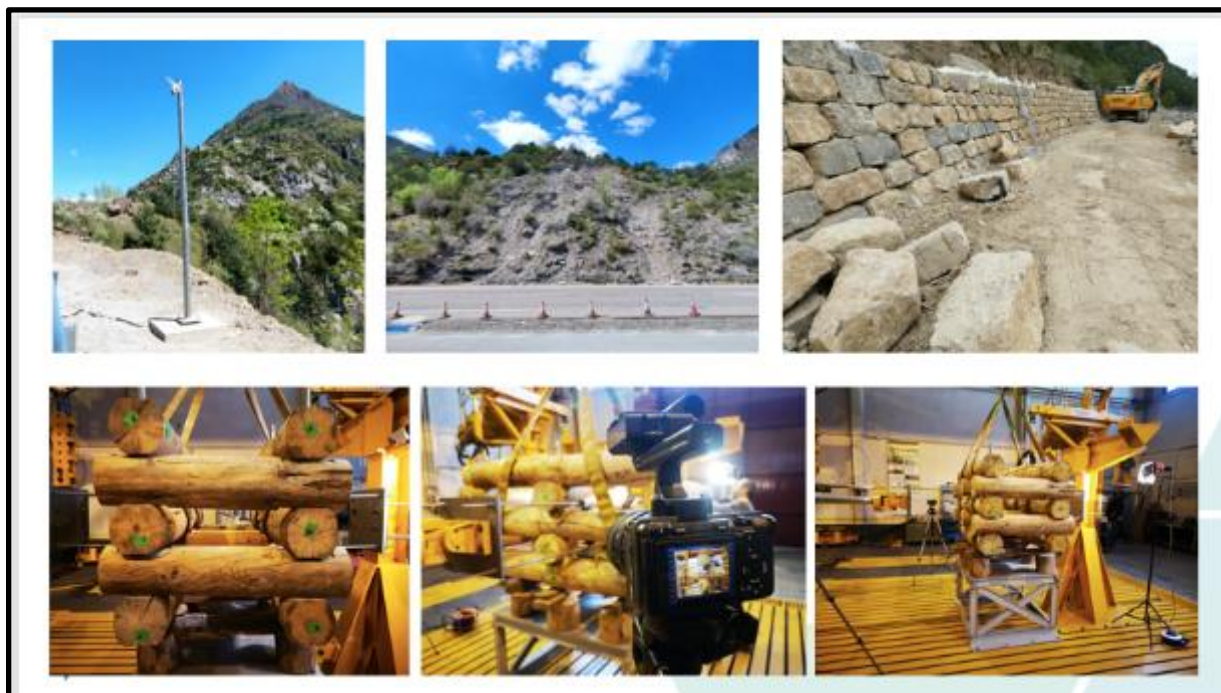


Figure 3-4. Illustrations de la mise en œuvre de la NBS sur le site de Santa Elena et du test de résistance de la structure en laboratoire.

Tâches / travail réalisé	Domaines					Intérêt particulier	Innovation
Erill	Données de base	Modélisation	Travaux	Surveillance	Gestion	Communication	
• Laboratoire EARLY WARNING	X						2009-2023
o Dashboard remote control - thresholds	X						
o Station météo	X						
o 5 piézomètres même vertical	X						
o Flowmeter (Q)	X						
o Géophones (4)	X						
o VX160 H6 System + Loadcells	X						
o Camera photo	X						
o Time laps camera	X						
• Lidar aérien	X						Utilisé pour la modélisation des forêts et des chutes de blocs
• Lidar terrestre	X						Inventaire des arbres (localisation, diamètre), modélisation chutes de blocs
• Stratigraphie historique	X						Modélisation aire occupation, hauteur max et pressions d'impact
• Inventaires des zones actuellement actives instables	X						Caractérisation précise des zones actives instables
• Control volumétriques des déplacement et transport dans le bassin							
• Modélisation théorique avant et après des NBS		X					Différentes configurations et période de return
• Site expérimental in situ		X					Expérimentation de la résistance des structures et de la forêt
• Mise en place des NBS et déplacement de blocs			X				Actif, passif – différents designs - exhaustif
• Modélisation des flues		X					Zones de départ, trajectoire et arrêt
• Living Lab						X	Interaction civil et technique
• Protocole de propriété, suivi, maintenance					X		Phusicos – Parc – Municipalité de Laruns
• Séminaire de restitution					X		Technicien et décideurs

Tableau 3-5. Principales activités pour la mise en œuvre du NBS sur le site d'Erill la Vall et l'intérêt particulier de chacune d'entre elles. Ce tableau a été présenté le deuxième jour de l'événement pour alimenter les réflexions des autorités et des participants.

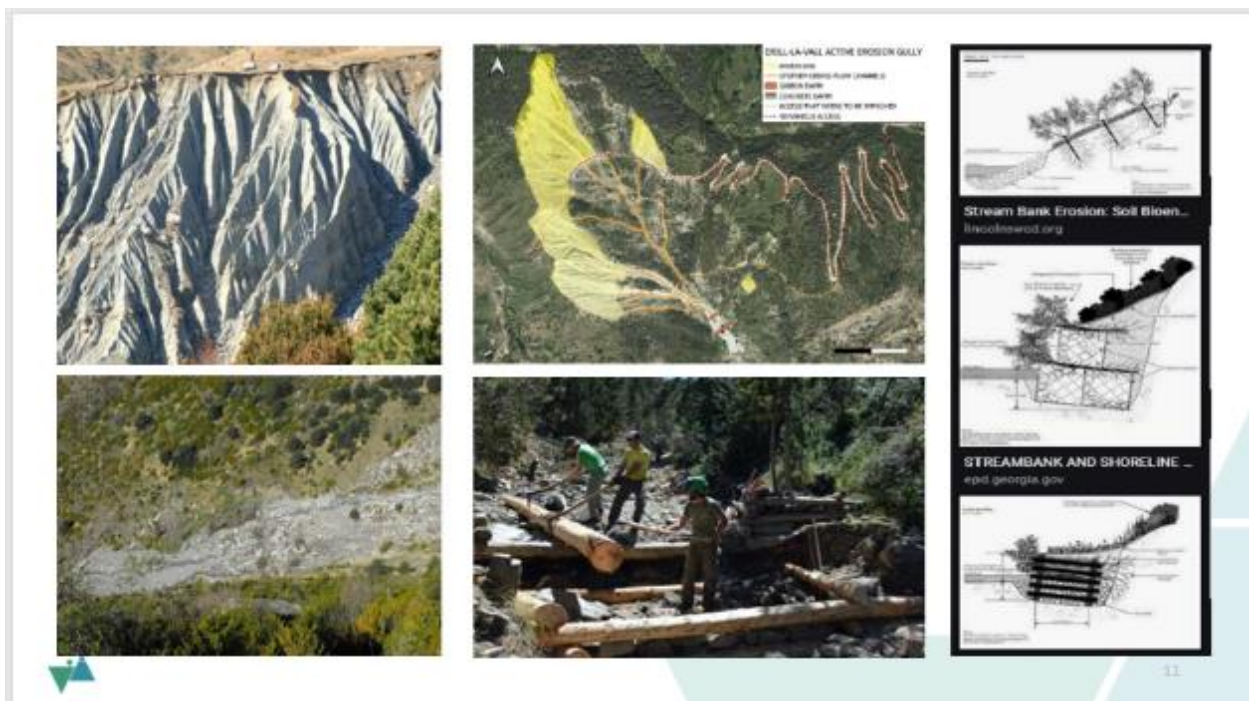


Figure 3-5. Illustrations de la mise en œuvre de la NBS sur le site d'Erill la Vall et de la conception des murs en krainer.

3.1.4 Résumé de l'expérience de la mise en œuvre de la NBS dans les quatre sites pyrénéens en tant que contribution à l'apprentissage global de la NBS pour la réduction des risques naturels dans les zones de montagne.

NBS sur le site du démonstrateur à grande échelle des Pyrénées : de nombreuses innovations qui ont un impact

Les NBS qui ont été mises en œuvre dans les sites pyrénéens ont été développées grâce à l'application de plusieurs avancées et innovations, notamment :

- L'utilisation de techniques Lidar (terrestre - drone - aéroporté) dans les sites d'Artouste, Erill la Vall et Capet Forest ; ces outils fournissent une qualité de données inégalée, avec la possibilité de réaliser des modèles numériques de terrain même dans des secteurs où la végétation est abondante, ce qui n'était pas le cas avec les techniques basées sur des orthophotographies.
- Une modélisation innovante a été mise en œuvre, d'une part pour modéliser la forêt en détail (type d'arbres, localisation et diamètre des troncs à partir de zones tests validées in situ et modèles de surface du terrain développés à partir de données Lidar), et d'autre part pour la modélisation des chutes de pierres sur le site d'Artouste.
- Réalisation d'essais en laboratoire pour valider la NBS mise en œuvre sur le site de Santa Elena.
- Mise en place d'une plate-forme d'essais grandeur nature au sein de l'entreprise du bois EIFORSA pour tester et valider les NBS mis en œuvre sur le site d'Artouste. Son maintien et sa pérennisation sont un élément clé pour la réalisation d'autres tests et, le cas échéant, la mise en place de protocoles de standardisation et de normalisation des NBS.
- Mise en place d'un site expérimental grandeur nature sur la commune de Laruns (sur le site de Gourzy) avec le soutien du maire et des membres du conseil municipal. De tels sites sont rares, ils doivent être pérennisés (identification des sources de financement, mise en place d'une campagne de communication pour informer les futurs projets et les acteurs qui ont besoin de tester les NBS pour réduire les risques de chutes de pierres).
- Conception, test et validation de NBS actifs et passifs pour réduire les chutes de pierres, couplés à l'utilisation de ressources forestières comme solution préventive naturelle. Les NBS ont également été développés en accord avec les pratiques de bio-ingénierie pour stabiliser les pentes exposées aux risques d'érosion (en particulier dans les dépôts de till glaciaire (site de Santa Elena), et dans les bassins versants fortement impactés (site d'Erill la Vall)).

NBS, alternatives ou complémentarité avec les solutions grises

A l'issue de PHUSICOS, la perception des NBS et de leur rôle a changé. Si ces solutions étaient largement considérées comme des alternatives aux solutions grises, le retour

d'expérience en site de montagne - et en particulier pour les problèmes liés aux chutes de pierres, à l'érosion et aux glissements de terrain peu profonds - les place désormais en complémentarité avec les solutions d'ingénierie grise. Cette complémentarité se manifeste sur le site d'Artouste, où l'on a installé un secteur avec des mesures "grises" dans les zones où l'on s'attend à des niveaux d'énergie élevés et des NBS dans les zones où les énergies sont plus faibles. Cette complémentarité s'observe également à l'échelle d'une structure aux réalisations mixtes (cas particulier du site de Santa Elena).

Les NBS ne peuvent pas être mis en œuvre là où les énergies mobilisées sont importantes. Cependant, les limites d'utilisation ne peuvent pas être définies de manière générique ; elles doivent être définies et validées au cas par cas, en fonction du danger à traiter et des matériaux disponibles pour la conception de solutions. C'est pourquoi les SNB doivent être conçus, dimensionnés et mis en œuvre dans un cadre d'ingénierie pluridisciplinaire. Le spectre des situations pour lesquelles le NBS peut être utilisé est cependant large, mais il reste à définir, à normaliser et à standardiser. Les installations expérimentales telles que celles de l'EIFORSA et les sites expérimentaux tels que Gourzy sont des outils particulièrement intéressants pour définir les limites et les solutions les plus adaptées.

NBS, Solutions basées sur la nature

À l'instar du rôle de la NBS dans l'éventail des solutions possibles pour réduire les risques, l'approche mise en œuvre par PHUSICOS dans les Pyrénées a évolué vers des solutions hybrides pragmatiques. Le retour d'expérience de la bio-ingénierie lors de la journée de formation a également contribué à élargir la perception de nombreux partenaires. Les terrasses mises en place à Santa Elena illustrent cette évolution. Les structures de base mises en place constituent le plus souvent une solution hybride plutôt qu'une NBS au sens strict. Comme pour les solutions grises, les structures mises en place servent à soutenir la mise en œuvre des systèmes végétaux. Cependant, contrairement aux solutions grises, les SPN mis en place seront progressivement et, dans de nombreux cas, rapidement englobés par la végétation naturelle et les structures de base se décomposeront jusqu'à disparaître. Ce n'est pas le cas des solutions grises. Les NBS peuvent donc être définies dans un cadre temporel plus large. Le retour d'expérience de la bio-ingénierie montre qu'en quelques années (parfois seulement 2 ou 3 ans), la nature reprend totalement les structures de base initiales conçues comme des facilitateurs.

NBS, quelle est leur efficacité en matière de réduction des risques ?

Il faut rappeler que les NBS développées et mises en œuvre dans les Pyrénées visaient exclusivement à réduire les dangers, et en aucun cas à réduire la vulnérabilité ou l'exposition des éléments à risque. C'est ce que montre la modélisation des chutes de pierres pour le site d'Artouste. L'efficacité des NBS est une réalité à condition qu'elles soient utilisées de manière appropriée. Si les NBS sont pertinentes pour réduire l'aléa chutes de pierres dans des contextes où le niveau d'aléa initial est " modéré ", ces solutions n'apportent pas nécessairement une réponse satisfaisante dans des contextes à forte énergie. En effet, l'utilité des NBS dépend totalement de leur conception. Il est

indéniable que le retour d'expérience et l'expérimentation ouvriront de nouvelles opportunités et valideront ces solutions pour de nouveaux domaines qui ne sont pas accessibles aujourd'hui. Tout comme les solutions grises, les NBS évolueront, et leur spectre de réponses positives avec.

Un point particulièrement important doit également être souligné en ce qui concerne leur efficacité. Les NBS se renforcent avec le temps, ce qui a pour effet de réduire les risques, mais aussi d'apporter un avantage économique. Les SNB s'autorégulent et s'entretiennent généralement d'eux-mêmes, alors que le coût de l'entretien augmente en général pour les solutions d'ingénierie grise. Par conséquent, les NBS représentent des solutions dont l'efficacité augmente progressivement et naturellement au fil du temps, et dont les coûts d'entretien diminuent, voire disparaissent.

NBS, favoriser le développement économique local

Il s'agit là d'un autre argument de poids en faveur de la promotion et du développement du NBS. Cette préoccupation est légitime et a été largement soutenue par le maire de Laruns. Le village dispose de ressources forestières considérables et le maire de Laruns a donc demandé que les SNB soient conçues et mises en œuvre avec des ressources locales et en impliquant autant que possible les entreprises locales. Ce point est particulièrement important dans la stratégie globale de conception des NBS, car il impose des conditions limites spécifiques aux scientifiques, aux techniciens et aux entreprises. Il ne s'agit pas d'identifier des ressources qui répondent à une conception donnée mais d'inverser la logique de contrainte en imposant au concepteur des ressources qui existent localement, avec leurs propres caractéristiques, et qui peuvent être moins bonnes que celles habituellement requises. C'est au concepteur de définir des solutions avec ce qui lui est fourni. Cette pratique est nouvelle et peut sembler quelque peu ésotérique, mais elle est riche de sens, de perspectives et d'innovation. Elle compliquera certainement la normalisation, la retardera peut-être, voire la rendra impossible, mais elle obligera les scientifiques, les autorités et les organismes de normalisation à changer de paradigme. Les paramètres d'entrée des modèles et des normes seront différents, mais ils conduiront à plus de pragmatisme, plus de personnalisation, à la réduction de l'empreinte carbone, au renforcement des économies locales et, par conséquent, à l'augmentation de l'acceptation des NBS.

3.1.5 La modélisation : intérêt et limites. Exemple de modélisation des éboulements sur le site d'Artouste

La modélisation des aléas est essentielle pour connaître les niveaux de risque et définir des solutions appropriées pour la réduction des risques. Elle est complexe car elle implique l'intégration de multiples paramètres parfois difficiles à obtenir, et dont les variabilités spatiales sont différentes. La modélisation des chutes de pierres réalisée sur le site d'Artouste par le BRGM et l'Université de Naples (UNINA) illustre à la fois l'intérêt de ces modèles, la difficulté d'accès à certains paramètres, la nécessité de procéder à certaines modifications, les limites des résultats et l'impact sur la

responsabilité des personnes en charge de la sécurité de la population, en particulier les maires.

De plus amples détails sur la modélisation des aléas se trouvent dans la section D4.4 *"Modélisation de l'évolution des aléas et des risques et identification de la période de retour des événements extrêmes auxquels la NBS pourrait résister en toute sécurité"*.

Bien que la modélisation ait été réalisée sur un secteur relativement important, la mise en œuvre des NBS (Figure 3-6) a été concentrée sur un secteur présentant un niveau de risque modéré. Sur le secteur pour lequel le niveau de risque était le plus élevé, une solution basée sur des filets métalliques a été privilégiée par le maire de la commune compte tenu du besoin de protection, de la responsabilité engagée et de l'historique des accidents survenus sur la route départementale 934 (sous-chapitre 1.2.2). Cette décision du maire a été confortée par les résultats de la modélisation de l'écoulement des éboulements.

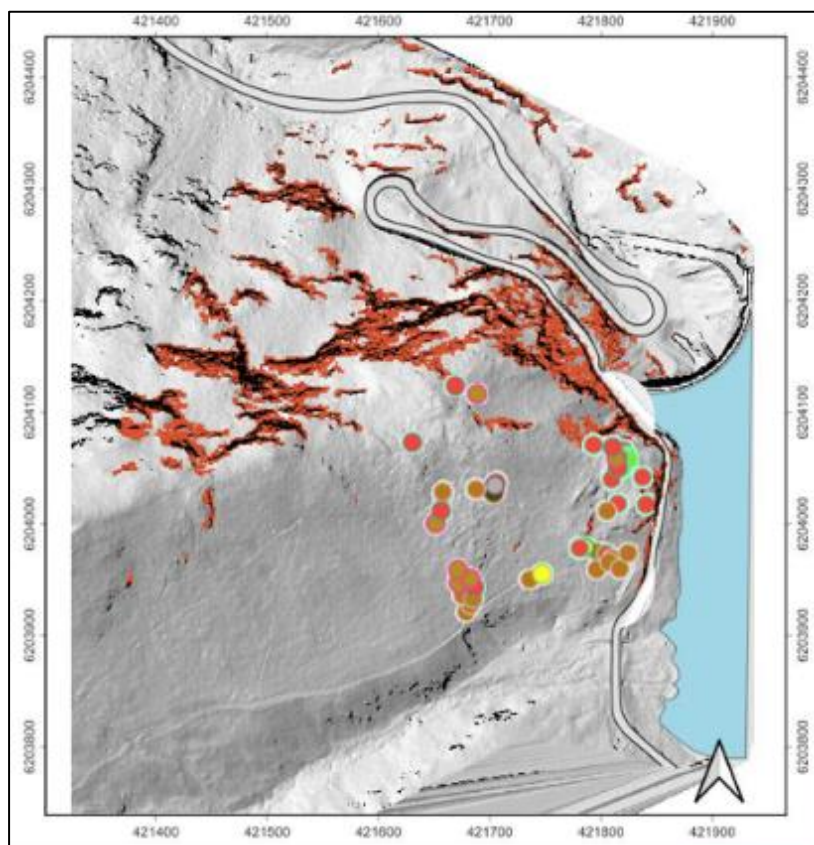


Figure 3-6. Schéma des différents types de structures NBS (rond).

Modélisation à l'aide de technologies et de méthodes innovantes

La modélisation a été réalisée à l'aide de données LIDAR aéroportées, ce qui a permis d'obtenir un modèle numérique de terrain avec une résolution de 25 cm. Le modèle ROCKYFOR3D (Dorren *et al.*, 2012) a été utilisé, avec les données suivantes :

- Modèle numérique de terrain, testant différentes résolutions.
- Les zones de départ des blocs, déterminées par le traitement du modèle numérique de terrain et une campagne de terrain.
- Différentes formes de blocs basées sur des enquêtes de terrain.
- Rugosité du sol à partir d'enquêtes sur le terrain et du traitement de modèles numériques de terrain.
- Cartes des types de sols basées sur des travaux de terrain et l'analyse de modèles numériques de terrain.
- Forêt (localisation exhaustive des arbres, de leur type et de leur diamètre sur une zone limitée à partir d'images Lidar terrestres), combinée à une modélisation de la canopée sur l'ensemble du site d'étude afin d'extrapoler les données acquises dans la zone d'essai.

L'acquisition de données de base avec des outils innovants (LIDAR), le traitement de ces données et la modélisation réalisée sur le site d'Artouste ont permis de mettre en évidence des niveaux de risque totalement différents entre les zones nord et sud (Figure 3-7), avec un niveau de risque beaucoup plus élevé dans la zone nord (énergie et hauteur de rebond plus importantes).

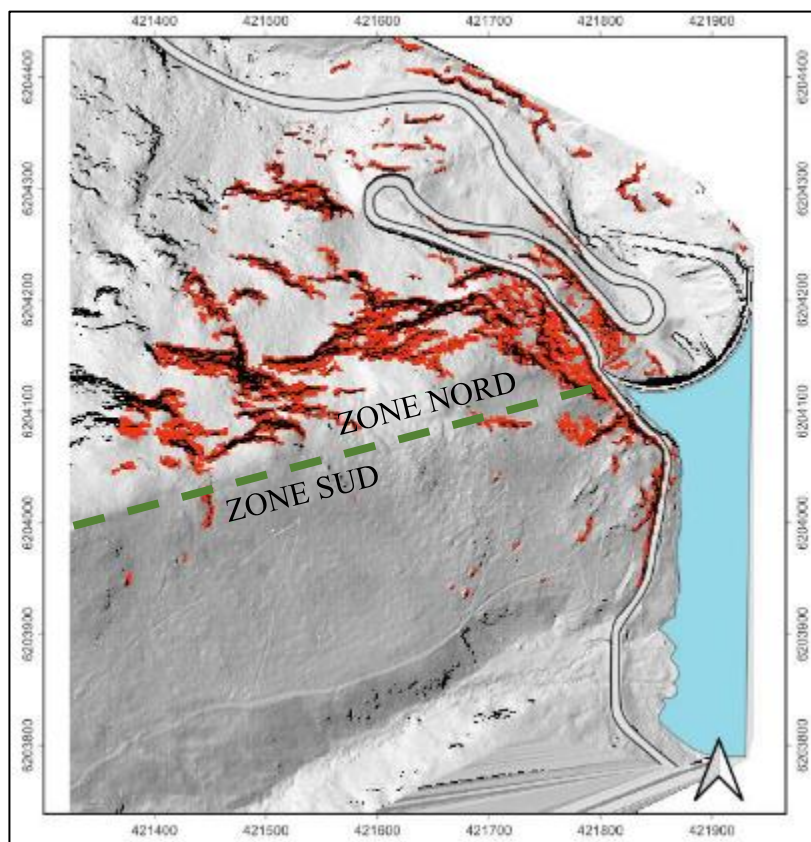


Figure 3-7. Localisation des zones de dégagement des blocs (en rouge et noir) dans les zones Nord et Sud (source : BRGM).

Les résultats obtenus ont été validés :

- Le choix du maire pour les solutions de réduction des risques, avec une solution d'ingénierie grise (filets métalliques au nord) et NBS au sud.
- La non-pertinence des seuls NBS au regard des énergies mises en jeu dans la zone nord (ils peuvent cependant désormais être ajoutés en complément des filets, notamment en tant que solutions actives dans les zones de départ).
- L'utilité du NBS dans la zone sud.

Même si les données acquises sont extrêmement précises grâce à l'utilisation des technologies Lidar aéroportées, la modélisation repose sur un processus défini sur la base de pixels unitaires, ce qui signifie que les données sont standardisées (lissées) sur une grille donnée pour procéder à la modélisation, que ce soit pour les pentes, les sols, la présence d'arbres, la rugosité des sols, ou les zones de libération des blocs. Cette agrégation est nécessaire par rapport au code de calcul, mais elle crée nécessairement des biais, même si ceux-ci sont limités par les campagnes de terrain qui permettent de calibrer les paramètres de base. Compte tenu des capacités de calcul actuelles, des efforts de R&D doivent être faits pour développer des logiciels de modélisation des trajectoires des blocs qui ne soient pas basés sur des modèles matriciels.

3.2 Apprendre de l'expérience des Living Labs dans les quatre sites du démonstrateur à grande échelle des Pyrénées

Au cours de la deuxième journée de l'événement, une mention du processus participatif, également appelé "*Living Labs*", a été faite pour mettre en évidence les résultats et partager les principales conclusions avec les participants. Ce sous-chapitre 3.2 reprend ce contenu.

3.2.1 Approche développée lors des Living Labs dans les Pyrénées

Chacun des quatre sites du démonstrateur à grande échelle des Pyrénées a fait l'objet d'une forte implication et d'un engagement de la part de multiples parties prenantes, par le biais des processus Living Lab.

Les laboratoires vivants sont considérés comme un banc d'essai et un environnement expérimental et innovant où les utilisateurs sont invités à discuter des problèmes et à co-crée et co-concevoir des mesures. Ils permettent à tout individu, groupe ou organisation intéressé par les interventions basées sur la nature de suivre le processus de conception, de planification, de mise en œuvre et d'évaluation.

L'implication des parties prenantes a été structurée tout au long des phases du projet, en recherchant un engagement particulier à chacune des étapes.

Phase 1. Conception de l'étude et du projet

- Contribution des connaissances locales.
- Participation à la collecte de données.
- Examen critique de la conception du projet.

Phase 2. Mise en œuvre des NBS

- Fournir des connaissances locales pendant la phase de construction.
- Mobiliser le matériel local.
- Impliquer les ressources humaines locales.

Phase 3. Pendant la période de construction et de garantie

- Participation à la surveillance.
- Participation à l'évaluation de l'efficacité des mesures.

3.2.2 Living Lab et autres activités de rencontre sur les sites pyrénéens

De nombreuses activités ont été développées dans le cadre du concept Living Lab. Tableau 3-6, Tableau 3-7, Tableau 3-8 et Tableau 3-9 décrivent les activités pour chacun des sites d'intervention de PHUSICOS dans les Pyrénées.

Date	Description du Living Lab et des autres activités de la réunion	Nombre de participants	Groupes de participants
11/09/2020	Visite de terrain et réunion pour présenter le NBS et les sites prévus pour PHUSICOS dans les Pyrénées	12	Décideurs, autorités, personnel technique des collectivités locales et départementales
17/11/2021	Réunion technique sur l'état d'avancement des sites de démonstration dans les Pyrénées	10	Experts techniques de chaque site, partenaires de PHUSICOS dans les Pyrénées
25/01/2022	Brainstorming technique sur les activités potentielles de surveillance dans le cas démonstratif des Pyrénées (partie de la réunion du Consortium élargie aux experts techniques des différents sites pyrénéens).	11	Experts techniques de chaque site, partenaires de PHUSICOS dans les Pyrénées
21/03/2022	Réunion de coordination avec les acteurs concernés pour présenter l'évaluation réalisée par l'ONF-RTM et le plan d'investissement pour la protection de Barèges et du Sers ; mention de la contribution de PHUSICOS à ce plan : Assistance technique (ONF - RTM x 4), équipe municipale (maire et conseiller municipal x 2), gouvernement départemental (sous-préfet et assistant départemental x 2), section développement régional (DDT x 1), communauté de travail des Pyrénées - CTP - OPCC (x1).	10	Décideurs et autorités au niveau local et départemental, personnel technique des gouvernements locaux et départementaux
07-11/04/2022	Réunion de démonstration et d'explication du site du Capet aux élèves de l'ECOLE DU PRINTEMPS à Lourdes, avec l'ONF-RTM	14	Étudiants, experts techniques

Date	Description du Living Lab et des autres activités de la réunion	Nombre de participants	Groupes de participants
13/04/2022	Réunion de recueil de commentaires et suggestions sur la plateforme PHUSICOS sur les NBS, organisée par le BRGM (FR)	6	Personnel technique des collectivités locales et départementales
27/09/2022	Réunion d'information publique (Living Lab) organisée en collaboration avec la municipalité et RTM-ONF - Présence de résidents locaux et de 3 autorités municipales	9	Expert technique, autorités locales et citoyens
27/09/2022	Entretien approfondi (mi-parcours) - Maire de Barèges	1	Autorité
10-14/10/2022	Visite de contrôle de l'IGN dans les Pyrénées Visite de terrain et réunion avec les maires de Barèges et de Sers, les experts techniques de l'IGN, l'expert technique de Capet, l'expert invité de l'INRAE, le reporter vidéo.	8	Experts techniques et autorités
10/02/2023	Progrès et dernières étapes sur les sites pyrénéens Réunion de coordination technique avec les partenaires PHUSICOS dans les Pyrénées, les experts techniques pour chaque site et l'expert participatif pour Erill, Santa Elena et Artouste.	9	Experts techniques de chaque site, expert participatif, partenaires PHUSICOS dans les Pyrénées
11 & 12/04/2023	Événement de formation et séminaire sur les résultats de PHUSICOS dans les Pyrénées	26 (11/04) 32 (12/04)	Autorités régionales, autorités locales et départementales, personnel technique des autorités locales et départementales, experts techniques des sites, petites et moyennes entreprises, ONG et citoyens

Tableau 3-6. Living Lab et autres activités de rencontre sur le site de la forêt du Capet, communes de Barèges et de Sers, Hautes-Pyrénées, France.

Date	Description du Living Lab et des autres activités de la réunion	Nombre de participants	Groupes de participants
11/09/2020	Visite de terrain et réunion pour présenter le NBS et les sites prévus pour PHUSICOS dans les Pyrénées	12	Décideurs, autorités, personnel technique des collectivités locales et départementales
Sept. 2020	Entretiens approfondis (5) avec des personnes concernées par les interventions à Artouste, Santa Elena	5	Personnel technique des collectivités locales et départementales

Date	Description du Living Lab et des autres activités de la réunion	Nombre de participants	Groupes de participants
15/04/2021	ARTOUSTE et SANTA ELENA - Présentation formelle du NBS aux acteurs locaux	38	Décideurs, autorités, personnel technique des collectivités locales et départementales
15/10/2021	Living Lab (virtuel) sur la conception du projet	14	Décideurs, autorités, personnel technique des gouvernements locaux et départementaux, partenaires de PHUSICOS dans les Pyrénées
17/11/2021	Réunion technique sur l'état d'avancement des sites démonstrateurs dans les Pyrénées	10	Experts techniques de chaque site, partenaires de PHUSICOS dans les Pyrénées
25/01/2022	Brainstorming technique sur les activités potentielles de surveillance dans le cas démonstratif des Pyrénées (partie de la réunion du Consortium élargie aux experts techniques des différents sites pyrénéens).	11	Experts techniques de chaque site, partenaires de PHUSICOS dans les Pyrénées
07-11/04/2022	Réunion et visite de terrain avec les élèves de l'école de printemps à Laruns et Santa Elena, avec l'EGCT Pirineos-Pyrénées	14	Étudiants, experts techniques
21/04/2022	Réunion visant à recueillir des commentaires et des suggestions sur la plateforme PHUSICOS sur les NBS, développée par le BRGM (ES)	9	Personnel technique des collectivités locales et départementales
22/04/2022	Visite de terrain avec des étudiants en master de l'Université polytechnique de Madrid	20	Étudiants, professeurs d'université, experts techniques
27/07/2022	Visite de terrain avec des étudiants en formation professionnelle en pépinière forestière et en jardinage paysager à Canfranc	18	Jeunes professionnels sur l'étude/pratique de la reconversion, expert technique
Sept. 2022	Entretiens approfondis	2	Personnel technique et décideurs des collectivités locales et départementales
10-14/10/2022	Visite de contrôle de l'IGN dans les Pyrénées Visite de terrain à Santa Elena avec les experts techniques de l'IGN, l'expert technique pour Santa Elena	5	Experts techniques
10/02/2023	Progrès et dernières étapes dans les sites pyrénéens	9	Experts techniques de chaque site, Expert participatif,

Date	Description du Living Lab et des autres activités de la réunion	Nombre de participants	Groupes de participants
	Réunion de coordination technique avec les partenaires PHUSICOS dans les Pyrénées, les experts techniques pour chaque site et l'expert participatif pour Erill, Santa Elena et Artouste.		partenaires PHUSICOS dans les Pyrénées
21/03/2023	Visite de terrain et réunion en plein air pour voir l'avancement des travaux à Santa Elena avec le maire de Biescas, le maire de Laruns (site d'Artouste) et leur équipe municipale, le personnel technique des gouvernements locaux et départementaux, les partenaires de PHUSICOS, les représentants des entreprises impliquées dans les travaux, l'Université polytechnique de Madrid, l'expert technique et participatif du site, les autorités et les techniciens des municipalités voisines.	19	Autorités locales et départementales, personnel technique des administrations locales et départementales, experts techniques des sites, petites et moyennes entreprises, étudiants
27/03/2023	Visite sur le terrain avec les autorités régionales, provinciales et municipales (directeur régional de la gestion et de l'entretien des routes du gouvernement d'Aragon)	14	Autorités locales et départementales, personnel technique des autorités locales et départementales, expert technique du site, petite et moyenne entreprise
11 & 12/04/2023	Événement de formation et séminaire sur les résultats de PHUSICOS dans les Pyrénées	26 (11/04) 32 (12/04)	Autorités régionales, autorités locales et départementales, personnel technique des autorités locales et départementales, experts techniques des sites, petites et moyennes entreprises, ONG et citoyens

Tableau 3-7. Laboratoire vivant et autres activités de réunion sur le site de Santa Elena, municipalité de Biescas, Aragon, Espagne.

Date	Description du Living Lab et des autres activités de la réunion	Nombre de participants	Groupes de participants
11/09/2020	Visite de terrain et réunion pour présenter le NBS et les sites prévus pour PHUSICOS dans les Pyrénées	12	Décideurs, autorités, personnel technique des collectivités locales et départementales
Sept. 2020	Entretiens approfondis (5) avec des personnes concernées par les interventions à Artouste, Santa Elena	5	Personnel technique des collectivités locales et départementales

Date	Description du Living Lab et des autres activités de la réunion	Nombre de participants	Groupes de participants
15/04/2021	ARTOUSTE et SANTA ELENA - Présentation formelle du NBS aux acteurs locaux	38	Décideurs, autorités, personnel technique des collectivités locales et départementales
09/09/2021	Réunion de coordination pour la définition du projet avec l'expert technique, l'équipe municipale, le Parc national des Pyrénées, l'ONF et les services techniques départementaux.	14	Décideurs, autorités, personnel technique des collectivités locales et départementales
15/10/2021	Réunion technique autour du site d'Artouste pour recueillir les réflexions sur les exercices de modélisation	10	Expert technique, membres et partenaires de l'Université de Madrid, partenaires de PHUSICOS dans les Pyrénées
17/11/2021	Réunion technique sur l'état d'avancement des sites de démonstration dans les Pyrénées	10	Experts techniques de chaque site, partenaires de PHUSICOS dans les Pyrénées
19/11/2021	Réunion de coordination pour présenter l'avancement des études pour les travaux à Artouste, le plan pour le laboratoire expérimental et définir un calendrier commun.	13	Décideurs, autorités et personnel technique des gouvernements départementaux locaux, experts techniques et partenaires de PHUSICOS dans les Pyrénées
25/01/2022	Brainstorming technique sur les activités potentielles de surveillance dans le cas démonstratif des Pyrénées (partie de la réunion du Consortium élargie aux experts techniques des différents sites pyrénéens)	11	Experts techniques de chaque site, partenaires de PHUSICOS dans les Pyrénées
07-11/04/2022	Réunion avec les autorités municipales et visite sur le terrain avec les élèves de l'école SPRING SCHOOL à Laruns et Santa Elena, avec l'EGCT Pirineos - Pyrénées	14	Étudiants, experts techniques
13/04/2022	Réunion visant à recueillir les commentaires et suggestions sur la plateforme PHUSICOS sur les NBS, développée par le BRGM (FR)	6	Personnel technique des collectivités locales et départementales
23/05/2022	Réunion avec le Parc national des Pyrénées. Début des négociations sur le cas d'Artouste avec le personnel de gestion du Parc National des Pyrénées, le personnel de gestion de la CTP, l'expert technique et la R&D.	9	Personnel de gestion du parc national des Pyrénées, expert technique et partenaires PHUSICOS dans les Pyrénées
29/06/2022	Réunion avec toutes les parties prenantes autour d'Artouste, 7 parties prenantes ont	15	Personnel de gestion du Parc national des Pyrénées, expert technique, décideurs, autorités, personnel technique

Date	Description du Living Lab et des autres activités de la réunion	Nombre de participants	Groupes de participants
	participé à cette réunion après de nombreux efforts bilatéraux.		des gouvernements locaux et départementaux et partenaires de PHUSICOS dans les Pyrénées.
Juin à septembre 2022	ÉCHANGES DE COORDINATION pour l'élaboration du protocole de collaboration. Courriels et échanges d'appels pour se mettre d'accord sur le contenu du protocole et les responsabilités.	15	Personnel de gestion du Parc national des Pyrénées, expert technique, décideurs, autorités, personnel technique des gouvernements locaux et départementaux et partenaires de PHUSICOS dans les Pyrénées.
21/09/2022	RÉUNION DE COORDINATION / COMITÉ TECHNIQUE 1ère réunion. Présentation du calendrier de travail pour le site d'Artouste et le site de Lab et des entreprises de travaux.	9	Expert technique, personnel de gestion du Parc national des Pyrénées, autorités locales et PME (entreprise affectée aux travaux à Artouste et superviseur technique embauché)
Sept. 2022	Entretien approfondi	1	Responsable de l'entretien des routes pour le département des Pyrénées-Atlantiques
07/10/2022	Visite de terrain à Artouste en compagnie d'un membre du conseil scientifique du parc national des Pyrénées et d'une autorité locale	3	Expert technique, Parc national des Pyrénées Membre du conseil scientifique, collectivité locale
10-14/10/2022	Visite de contrôle de l'IGN dans les Pyrénées Visite de terrain à Artouste et réunion avec le maire de Laruns et l'équipe municipale, les experts techniques de l'IGN, l'expert technique pour Artouste.	8	Autorités et experts techniques
10/02/2023	Progrès et dernières étapes dans les sites pyrénéens Réunion de coordination technique avec les partenaires PHUSICOS dans les Pyrénées, les experts techniques pour chaque site et l'expert participatif pour Erill, Santa Elena et Artouste.	9	Experts techniques de chaque site, Expert participatif, partenaires PHUSICOS dans les Pyrénées
20/02/2023	Réunion du comité technique (selon le protocole de collaboration signé pour l'autorisation des travaux)	15	Membres du comité technique, composé de représentants de la municipalité de Laruns, du parc national des Pyrénées, du gouvernement départemental des Pyrénées-Atlantiques, du RTM-ONF, de l'ONF Pyrénées-

Date	Description du Living Lab et des autres activités de la réunion	Nombre de participants	Groupes de participants
			Atlantiques, du GECT Pirineos-Pyrénées et du CTP-OPCC.
21/03/2023	Visite de terrain et réunion en plein air pour voir l'avancement des travaux à Artouste et sur le site expérimental de La Peña, avec le maire de Laruns et son équipe municipale, le personnel technique des gouvernements locaux et départementaux, les représentants du Parc national des Pyrénées, les partenaires de PHUSICOS, les représentants des entreprises impliquées dans les travaux, l'Université polytechnique de Madrid, l'expert technique et participatif du site, les autorités et les techniciens des municipalités voisines.	19	Autorités locales et départementales, personnel technique des autorités locales et départementales, experts techniques des sites, petites et moyennes entreprises, étudiants
03/04/2023	Visite de terrain à Artouste avec les membres du comité technique (selon le protocole de collaboration signé pour l'autorisation des travaux)	5	Expert technique, membre de RTM-ONF, autorité locale, représentants des entreprises impliquées dans les travaux
11 & 12/04/2023	Événement de formation et séminaire sur les résultats de PHUSICOS dans les Pyrénées Visite du site d'Artouste dans le cadre du séminaire	26 (11/04) 32 (12/04)	Autorités régionales, autorités locales et départementales, personnel technique des autorités locales et départementales, experts techniques des sites, petites et moyennes entreprises, ONG et citoyens

Tableau 3-8. Living Lab et autres activités de réunion sur le site d'Artouste, municipalité de Laruns, Pyrénées Atlantiques, France.

Date	Description du Living Lab et des autres activités de la réunion	Nombre de participants	Groupes de participants
21/07/2021	Introduction au NBS et au projet PHUSICOS, visite du site avec l'équipe municipale, les parties prenantes régionales et locales.	16	Décideurs, autorités, personnel technique des collectivités locales et régionales, experts techniques
08/09/2021	Réunion de coordination entre les parties prenantes impliquées : Assistance technique, équipe municipale, gouvernement régional de Catalogne (OCCC)	4	Décideurs, autorités, personnel technique des collectivités locales et régionales, experts techniques
10/09/2021	Session Living Lab (FtF) avec des habitants de la vallée	27	Décideurs, autorités, personnel technique des collectivités locales et

Date	Description du Living Lab et des autres activités de la réunion	Nombre de participants	Groupes de participants
			régionales, citoyens, experts techniques
28/10/2021	Réunion de coordination entre les acteurs concernés : Assistance technique, équipe municipale, gouvernement régional de Catalogne (OCCC)	6	Décideurs, autorités, personnel technique des collectivités locales et régionales, experts techniques
17/11/2021	Réunion technique sur l'état d'avancement des sites de démonstration dans les Pyrénées	10	Experts techniques de chaque site, partenaires de PHUSICOS dans les Pyrénées
25/11/2021	Réunion de coordination entre les parties prenantes impliquées : Assistance technique, équipe municipale, gouvernement régional de Catalogne (OCCC)	5	Décideurs, autorités, personnel technique des collectivités locales et régionales, experts techniques
17/12/2021	Réunion de coordination entre les parties prenantes impliquées : Assistance technique, équipe municipale, gouvernement régional de Catalogne (OCCC)	6	Décideurs, autorités, personnel technique des collectivités locales et régionales, experts techniques
17/12/2021	Living Lab avec les citoyens pour expliquer le contexte et comparer la solution proposée avant sa mise en œuvre.	13	Décideurs, autorités, personnel technique des collectivités locales et régionales, citoyens, experts techniques
25/01/2022	Brainstorming technique sur les activités potentielles de surveillance dans le cas de démonstration des Pyrénées (partie de la réunion du Consortium élargie aux experts techniques des différents sites pyrénéens)	11	Experts techniques de chaque site, partenaires de PHUSICOS dans les Pyrénées
04/03/2021	Réunion de coordination entre les parties prenantes impliquées : Assistance technique, équipe municipale, gouvernement régional de Catalogne (OCCC)	6	Décideurs, autorités, personnel technique des collectivités locales et régionales, experts techniques
07-11/04/2022	Réunion avec les autorités municipales et visite sur le terrain avec les élèves de l'école SPRING à Vall de Boí, avec Kuroba4	14	Étudiants, experts techniques
21/04/2022	Réunion pour recueillir des commentaires et des suggestions sur la plateforme PHUSICOS sur les NBS, développée par le BRGM (ES)	9	Personnel technique des collectivités locales et départementales
28/07/2022	Visite sur le terrain et séance publique d'information de la société civile avec les autorités	13	Décideurs, autorités, personnel technique des collectivités locales et régionales, citoyens, experts techniques

Date	Description du Living Lab et des autres activités de la réunion	Nombre de participants	Groupes de participants
Sept. 2022	Entretiens approfondis	2	Autorités, personnel technique des collectivités locales et régionales
10-14/10/2022	Visite de contrôle de l'IGN dans les Pyrénées Visite de terrain à Erill avec les experts techniques de l'IGN, l'expert technique d'Erill et le maire de Vall de Boí	6	Experts techniques
22/10/2022	Visite sur le terrain et séance publique d'information de la société civile avec les autorités		Décideurs, autorités, personnel technique des collectivités locales et régionales, citoyens, experts techniques
10/02/2023	Progrès et dernières étapes dans les sites pyrénéens Réunion de coordination technique avec les partenaires PHUSICOS dans les Pyrénées, les experts techniques pour chaque site et l'expert participatif pour Erill, Santa Elena et Artouste.	9	Experts techniques de chaque site, Expert participatif, partenaires PHUSICOS dans les Pyrénées
23/03/2023	Réunion de coordination entre les parties prenantes impliquées : Assistance technique, équipe municipale, gouvernement régional de Catalogne (OCCC)	6	Décideurs, autorités, personnel technique des collectivités locales et régionales, experts techniques
11 & 12/04/2023	Événement de formation et séminaire sur les résultats de PHUSICOS dans les Pyrénées	26 (11/04) 32 (12/04)	Autorités régionales, autorités locales et départementales, personnel technique des autorités locales et départementales, experts techniques des sites, petites et moyennes entreprises, ONG et citoyens
22/04/2023	Living Lab avec les citoyens et les autorités pour voir et commenter l'avancement final des travaux		Décideurs, autorités, personnel technique des collectivités locales et régionales, citoyens, experts techniques

Tableau 3-9. Living Lab et autres activités de rencontre sur le site d'Erill la Vall, municipalité de Vall de Boí, Catalogne, Espagne.

3.2.3 Enseignements tirés des activités du Living Lab sur les sites pyrénéens

Le travail effectué par PHUSICOS dans les Pyrénées et le développement des laboratoires vivants pour soutenir la mise en œuvre des NBS ont permis de tirer des leçons et des conclusions importantes :

- Les laboratoires vivants apportent des connaissances aux populations locales et les sensibilisent aux dangers naturels et aux risques correspondants présents dans une région.
- Les laboratoires vivants revalorisent les connaissances locales et donnent la parole aux citoyens et à tous les acteurs intéressés qui prennent part à ces espaces et processus participatifs. Ils donnent une perspective nouvelle, innovante et technologique aux savoirs anciens et traditionnels, souvent oubliés ou négligés.
- Dans la plupart des Living Labs, une vague sensation d'incapacité à influencer ou à juger le travail existe, déléguant l'expertise technique à des spécialistes embauchés pour concevoir les solutions. Cela s'est traduit par des difficultés à mobiliser les parties prenantes et/ou à recueillir des avis au cours des sessions. Cela confirme la nécessité d'un processus de renforcement de la confiance comme base pour échanger et débattre de la validité des solutions, mais aussi pour garantir des espaces de libre échange et de respect de toutes les opinions.

3.3 Co-bénéfices du NBS et de la surveillance des sols : recommandations pour les sites de Capet et de Santa Elena

Le présent sous-chapitre 3.3 reprend une partie des éléments présentés lors de la deuxième journée de l'événement, en particulier ceux axés sur les co-bénéfices de la NBS. La partie consacrée aux indicateurs de suivi des sols et les recommandations visant les sites de Capet Forest et Santa Elena constituent un engagement du CREAM à restituer les résultats d'analyse des sols et les principales conclusions pour la mise à jour des protocoles de suivi des sols RTM-ONF. L'objectif de leur inclusion dans ce rapport est de les mettre à la disposition de tout technicien forestier intéressé par l'application du NBS et le suivi des bénéfices sur la séquestration du carbone et d'autres services écosystémiques. Dans ce sous-chapitre, les références et les recommandations sont adaptées à la NBS mise en œuvre dans les sites de Capet Forest et de Santa Elena. Néanmoins, la plupart des indicateurs et des procédures correspondantes peuvent être appliqués à d'autres sites faisant l'objet d'une intervention NBS.

NBS a entrepris de réduire le risque posé par les glissements de terrain, les chutes de pierres et les avalanches de neige dans les zones montagneuses. Elles comprennent toujours des effets sur le sol et la végétation, car ceux-ci sont souvent utilisés comme des outils naturels pour atteindre les résultats escomptés. Le sol et la végétation naturels du site d'intervention et des environs peuvent également être directement ou indirectement affectés par les opérations. Les SNB ont donc des effets collatéraux sur ces composantes clés des écosystèmes terrestres et sur les services écosystémiques qu'elles fournissent. L'amélioration des services écosystémiques est une condition pour qu'une opération soit considérée comme un SNG et, par conséquent, les impacts sur le

sol et la végétation doivent être évalués dans le cadre de l'**évaluation de l'impact des** SNG.

L'évaluation de l'impact est essentielle pour acquérir des connaissances sur l'efficacité des interventions et pour progresser vers la systématisation des bonnes pratiques dans des conditions environnementales spécifiques. Dans cette optique, l'évaluation d'impact évalue les effets causaux des changements dans les sols et les communautés végétales liés à l'intervention des SNB.

La surveillance de l'impact est un processus continu qui commence avant le début des opérations et se poursuit après leur achèvement. Le suivi permet d'évaluer l'évolution dans le temps d'indicateurs sélectionnés pour le sol et les plantes, à partir d'une valeur pré-opérationnelle ou immédiatement post-opérationnelle (ligne de base) vers leur valeur attendue sur un **site de référence** (suivi de la performance). Une valeur finale de référence devrait être spécifiée pour chaque indicateur, ainsi que la progression attendue de l'indicateur dans le temps, afin que des interventions correctives puissent être conçues pour corriger les problèmes et les trajectoires indésirables et pour soutenir la gestion adaptative (Raymond *et al.*, 2017).

Les sites de référence sont physiquement et biologiquement équivalents à la zone affectée par les opérations, mais ne sont pas perturbés et montrent le potentiel environnemental optimal du site. Le site de référence représente l'état désiré à atteindre dans la zone affectée par le NBS.

Dans les climats tempérés, étant donné la réponse parcimonieuse du système sol-plante aux perturbations ou aux manipulations, la surveillance du sol et des plantes peut durer longtemps après la mise en œuvre de la NBS, et un laps de temps considérable peut être nécessaire avant d'observer des progrès vers certains objectifs (par exemple, l'augmentation des stocks de carbone dans le sol, la colonisation de la zone par les arbres, etc. Les plans de surveillance devraient idéalement inclure des indicateurs d'écosystème qui réagissent à court ou moyen terme, afin de fournir des indications à court terme et de réduire les coûts de surveillance à long terme. Dans ce cas, le suivi doit également se faire à l'échelle temporelle à laquelle les mesures pertinentes fonctionnent.

Dans une situation idéale, si les mesures mises en œuvre sont appropriées et qu'aucune perturbation inattendue ne se produit, le nouveau système sol-plante évoluera lentement de l'état post-opérationnel vers l'état de référence souhaité, et ce processus peut être évalué par l'évolution d'**indicateurs** quantitatifs et mesurables.

3.3.1 Choix des indicateurs appropriés pour le sol et les plantes

Un plan de suivi doit comprendre un **ensemble** approprié d'**indicateurs** qui doivent être soigneusement mesurés avant le déploiement du NBS.

Les indicateurs utiles et opérationnels doivent satisfaire aux exigences suivantes (Doran, 2002 ; EEA, 2023) :

- (a) ils doivent fournir des informations sur les processus clés de l'écosystème
- (b) ils doivent intégrer les propriétés physiques, chimiques et biologiques

(c) ils doivent être sensibles à la gestion et aux variations climatiques

(d) ils doivent être fiables, reproductibles et applicables à un large éventail de sites, et

(e) ils doivent être accessibles et pratiques pour les spécialistes de l'agriculture, les producteurs, les défenseurs de l'environnement et les décideurs politiques. L'accès à ces indicateurs implique la disponibilité de méthodes d'analyse et l'indicateur doit pouvoir être interprété par l'utilisateur final.

Étant donné la grande quantité de services fournis par le sol et le fait que les événements géologiques modifient de nombreuses caractéristiques du sol dans les domaines physique, chimique et biologique, il est nécessaire de disposer de séries d'indicateurs plutôt que d'un seul indicateur. Les indicateurs doivent représenter l'état des différentes fonctions du sol par rapport à la valeur de base et à la valeur souhaitée, qui correspond à la valeur de l'indicateur dans l'état de référence.

La valeur finale doit être accompagnée d'une tendance à l'évolution vers la guérison et d'un calendrier.

3.3.1.1 Indicateurs du sol et de la plante pour le NBS mis en œuvre dans la forêt de Capet et la coupe de Santa Elena

Ce rapport se concentre sur les fonctions des plantes et des sols qui offrent des avantages connexes utiles dans le domaine de l'atténuation du changement climatique et de l'habitat pour l'activité biologique : le stockage du carbone, le cycle des nutriments et l'habitat pour l'activité biologique.

3.3.1.2 Processus de présélection

Malheureusement, jusqu'à présent, tous les efforts visant à obtenir un ensemble d'indicateurs universellement applicables pour évaluer la capacité des NBS à améliorer les services écosystémiques fournis par le système sol-plante ont été vains.

Cela est dû au fait que les relations entre le sol et les plantes dépendent du contexte et sont fortement influencées par la biogéographie, le climat local, la géologie, la topographie et l'utilisation des sols, ainsi que par des caractéristiques moins visibles telles que l'histoire de l'utilisation des sols et la structure du paysage. En outre, une myriade de facteurs affecte la capacité des plantes et des organismes du sol à coloniser les zones nouvellement créées ou restaurées, c'est-à-dire à se répandre, à s'établir et à prospérer.

En outre, même si certains indicateurs peuvent être utilisés de manière universelle (par exemple, le pourcentage de couverture végétale), leur valeur de référence optimale et le taux de changement entre la valeur de base et la valeur de référence sont, une fois de plus, spécifiques à chaque cas.

Dans le cadre du projet PHUSICOS, les études de cas de la coupure de Santa Elena et de la forêt de Capet sont situées sur la même chaîne de montagnes, et les écosystèmes

concernés partagent certaines caractéristiques clés telles qu'une topographie très défavorable, un climat de montagne, l'instabilité du substrat géologique et la non-exploitation des forêts (à l'exception du pâturage dans les parties les plus élevées de la forêt de Capet).

C'est pourquoi, dans un premier temps, nous avons dressé une liste prospective des propriétés du sol et des plantes que nous avons étudiées pour déterminer leur sensibilité à la maturation des nouveaux systèmes sol-plante créés dans la tranchée de Santa Elena et à l'amélioration de la couverture végétale dans la forêt de Capet. La liste est basée sur l'expertise de l'équipe de recherche et comprend les propriétés indiquées dans le Tableau 3-10.

Ces propriétés ont été mesurées dans la zone d'influence des deux NBS à l'aide d'un plan d'échantillonnage stratifié, ce qui signifie que nous avons divisé les zones d'étude en unités de végétation homogènes en fonction de leur état de maturité et que nous avons réparti les points d'échantillonnage de manière aléatoire au sein de chacune de ces unités. Ce faisant, nous avons identifié les propriétés qui discriminent entre les stades de maturité du système plante-sol et qui sont donc utiles en tant qu'informations sur la maturation correcte des systèmes recréés (Santa Elena) ou améliorés (forêt de Capet).

Les caractéristiques morphologiques et les formes de vie des plantes étaient plus révélatrices des progrès réalisés après l'opération que la composition des espèces. Les propriétés biologiques du sol étaient nettement plus sensibles à la maturation de l'écosystème après l'opération que les propriétés physiques et chimiques du sol, ce qui suggère que le programme de surveillance devrait inclure des indicateurs basés sur le biote du sol ainsi que des indicateurs fonctionnels des plantes, et que certains indicateurs physiques et chimiques du sol devraient également être mesurés pour aider à l'interprétation de l'évolution globale du système.

SECTOR	ECOSYSTEM SERVICE	INDICATOR	Unit
Soil	Belowground C sequestration	Total organic carbon stock (Total C _{org})	g C . m ⁻²
		Labile organic carbon (C _{org} in the fast pool)	g C . m ⁻²
		Recalcitrant organic carbon (C _{org} in the slow pool)	g C . m ⁻²
		Physically protected organic C	%
	Soil physical resilience	Soil erodibility (aggregate stability)	mm
		Soil bulk density	g cm ⁻³
	Biodiversity provision	Microbial diversity	
		Microbial species richness	number of species
		Microbial species diversity	unitless
		Microbial species evenness	unitless
		Microbial catabolic diversity	unitless
		Invertebrate functional diversity	
		Flagellates	mg C g ⁻¹ dry soil
		Amoebae	mg C g ⁻¹ dry soil
		Ciliates	mg C g ⁻¹ dry soil
		Total protists	mg C g ⁻¹ dry soil
		Bacterial feeder nematodes	mg C g ⁻¹ dry soil
		Fungal feeder nematodes	mg C g ⁻¹ dry soil
		Plant-feeder nematodes	mg C g ⁻¹ dry soil
		Omnivore nematodes	mg C g ⁻¹ dry soil
		Predatory nematodes	mg C g ⁻¹ dry soil
		Total nematodes	mg C g ⁻¹ dry soil
		Predatory Mites	mg C g ⁻¹ dry soil
		Nematophagous Mites	mg C g ⁻¹ dry soil
		Nematophagous prostigmatic mites	mg C g ⁻¹ dry soil
		Collembola	mg C g ⁻¹ dry soil
		Fungivorous cryptostigmatic mites	mg C g ⁻¹ dry soil
		Fungivorous Prostigmata	mg C g ⁻¹ dry soil
		Diplura	mg C g ⁻¹ dry soil
		Symphyla	mg C g ⁻¹ dry soil
		Protura	mg C g ⁻¹ dry soil
		Total microarthropods	mg C g ⁻¹ dry soil
	Biodiversity functions	Carbon mineralization by the soil food web	g C m ⁻² y ⁻¹
		Theoretical soil food web stability	y ⁻¹
Plants	Aboveground C sequestration	Total aboveground carbon stock	t C ha ⁻¹
	Biodiversity provision & treats	Species richness	number of species
		Species diversity	unitless
		Evenness	unitless
		Invasive species	Number of species
	Soil protection	Soil vegetation cover	%

Tableau 3-10. Liste des propriétés des sols et des plantes étudiées dans le cadre du projet PHUSICOS en vue d'une utilisation potentielle comme indicateurs de l'amélioration des services fournis par les sols et les plantes dans les études de cas de la coupe de Santa Elena et de la forêt de Capet.

3.3.2 Indicateurs végétaux et pédologiques sélectionnés pour les sites de la forêt de Capet et de Santa Elena

Sur la base de l'examen préliminaire susmentionné, nous avons combiné les propriétés sensibles des plantes et des sols pour produire un ensemble d'indicateurs qui peuvent être utilisés pour surveiller les deux sites d'étude. L'ensemble final d'indicateurs est présenté dans le Tableau 3-11.

	Climate change mitigation	Biodiversity provision
Plant Indicators		
I.1 Aboveground carbon stock	X	
I.2 Aboveground carbon sequestration	X	
I.3 Total plant cover	X	X
I.4 Woody plant cover	X	X
I.5 Land cover evolution		X
I.6 Mortality and growth of planted saplings		X
I.7 Invasive species		X
Soil physical and chemical indicators		
I.8 Soil organic carbon content	X	
I.9. Carbon sequestration in soil	X	
Soil biological indicators		
I.10 SBQ Index (soil microarthropods)		X
I.11 Taxonomic and functional diversity (soil microbes)		X

Tableau 3-11. Indicateurs relatifs aux sols et aux plantes sélectionnés pour contrôler l'effet de la NBS mise en œuvre dans les cas d'étude de la forêt de Capet et de Santa Elena sur les services écosystémiques des sols et des plantes (atténuation du changement climatique et maintien de la biodiversité).

3.3.3 Indicateurs de plantes

Stock de carbone en surface (I.1) et séquestration du CO₂ en surface (I.2) dans les plantes

Près de 85% du carbone terrestre aérien (C) est stocké dans les forêts (Rodger, 1993), qui jouent un rôle clé dans le cycle global du carbone en éliminant une quantité substantielle de dioxyde de carbone (Cc) de l'atmosphère. Le stock de C dans la végétation ligneuse vivante (arbustes et arbres) est le résultat de l'équilibre entre son augmentation par la croissance des plantes et sa diminution par la coupe ou la mortalité (Vayreda *et al.*, 2012). Lorsque la croissance est supérieure aux pertes, il en résulte une séquestration nette de CO₂ ; au contraire, si les pertes sont supérieures à la croissance, il en résulte une libération de CO₂ dans l'atmosphère (émission de CO₂).

Le stock de carbone et la séquestration du CO₂ dans les forêts sont des indicateurs des services écosystémiques liés à la régulation du climat ; le stock, parce que le stockage du carbone est un moyen d'empêcher le CO₂ (un gaz à effet de serre) d'entrer dans l'atmosphère, et la séquestration, parce que les forêts contribuent à éliminer le CO₂ de l'atmosphère et, par conséquent, à réduire l'impact du changement climatique.

▪ Méthode d'échantillonnage

Les deux sites d'étude (Santa Elena et la forêt de Capet) devraient faire l'objet d'un échantillonnage pour les stocks de carbone aériens et la séquestration du CO₂ les années 2, 4 et 6 après la fin des opérations, et tous les cinq ans par la suite. Les échantillonnages

devraient être effectués à la fin du printemps ou en été, lorsqu'il n'y a pas de neige et qu'il y a plus d'heures d'ensoleillement.

Dans la forêt de Capet, 32 placettes d'échantillonnage doivent être localisées de manière aléatoire dans la zone en utilisant une grille régulière de 100x100 m, ce qui donne un total de 32 placettes d'échantillonnage (Figure 3-8).

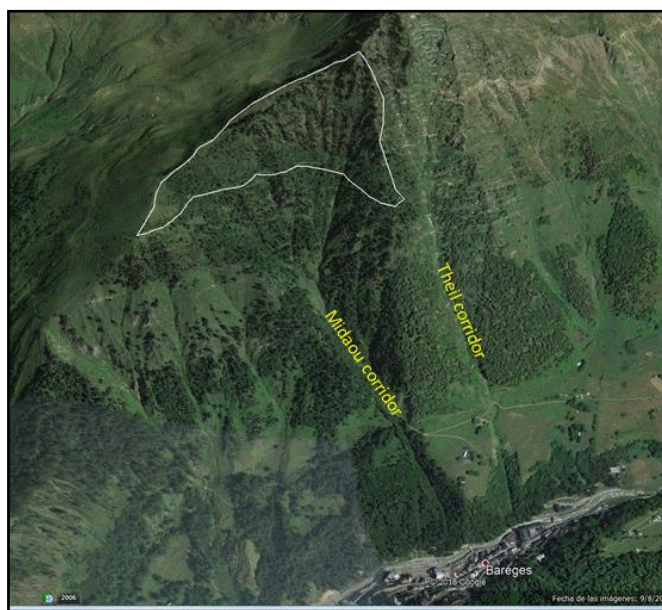


Figure 3-8. Zone de travail dans la forêt de Capet. La zone de surveillance est entourée en blanc.

Les parcelles doivent être circulaires et avoir un rayon de 10 m. Le centre des parcelles doit être localisé à l'aide d'un GPS (précision < 5 m) afin de pouvoir les retrouver lorsqu'elles seront rééchantillonnées à l'avenir.

A Santa Elena, avec une petite zone affectée (environ 0,05 ha), 5 des 10 terrasses créées dans la tranchée de la route devraient être échantillonnées (Figure 3-9).



Figure 3-9. Zone de travail dans la tranchée de Santa Elena. La zone de surveillance comprend dix terrasses de 2 m de large et de longueur décroissante (de 30 m pour le niveau le plus bas à environ 10 m pour le niveau supérieur).

Dans chaque parcelle d'échantillonnage (dans la forêt de Capet) et dans les terrasses (à Santa Elena), tous les arbres dont le DHP (diamètre du tronc à hauteur de poitrine) est supérieur à 7,5 cm dans le rayon de la parcelle (distance au centre corrigée en fonction de la pente) doivent être mesurés. Pour chaque arbre, le DHP (mesuré à l'aide d'un ruban de diamètre), la hauteur au sommet (à l'aide d'un distancemètre ou équivalent) doivent être mesurés et l'espèce notée. Dans une sous-placette de 5 mètres de rayon, le nombre d'arbres par espèce sera annoté en distinguant deux classes de taille pour la régénération : les arbres d'une hauteur supérieure à 1 m et d'un DHP < 2,5 cm et les arbres d'un DHP compris entre 2,5 cm et 7,5 cm.

Pour chaque campagne de surveillance, la biomasse aérienne totale par arbre (kg/arbre) et par parcelle est calculée à l'aide de l'équation qui relie le DBH et la hauteur de l'arbre à la biomasse aérienne. Cette équation est spécifique à chaque espèce et peut être obtenue sur le [site https://laboratoriforestal.creaf.cat/allometrapp/](https://laboratoriforestal.creaf.cat/allometrapp/). Toutes les valeurs estimées de la biomasse sont additionnées pour obtenir la biomasse par placette et multipliées par 31,83 pour obtenir la valeur équivalente à un hectare (rapport entre un hectare = 10 000 m² et la surface de la placette d'échantillonnage, $r = 10$ m, $A = 314,16$ m²). Enfin, la valeur est multipliée par 0,5 (1 kg de MO = 0,5 kg de C) pour obtenir le stock de C (tC ha)⁻¹.

La séquestration du carbone aérien ou la variation du stock de carbone par parcelle (t-ha⁻¹ -yr⁻¹) est la différence entre les stocks de carbone de deux inventaires forestiers successifs divisée par 5 (années).

La valeur moyenne de toutes les parcelles est calculée et multipliée par la superficie du site d'étude pour obtenir le stock total de C (tC) et la variation totale du stock de C (tC - an)⁻¹.

▪ Évolution souhaitée des indicateurs dans le temps

En l'absence de perturbations de forte intensité (exploitation non durable, avalanches de neige, glissements de terrain, tempêtes de vent, incendies de forêt, sécheresses,

pâturage...), le stock de carbone devrait augmenter au fil de la succession écologique jusqu'à la stabilisation finale. Les broussailles remplaceront les prairies et les arbres remplaceront les buissons tout au long du processus de succession.

Le taux de changement est différent pour les deux sites d'étude :

- Dans la forêt du Capet, il faut environ 30 ans pour obtenir une forêt de pins. Sur la base des valeurs mesurées dans les peuplements de référence, les stocks de carbone devraient être d'environ 15 tC ha⁻¹ dans les pinèdes de 30 ans.
- à Santa Elena, 5 ans sont nécessaires pour obtenir une couverture dense de buissons et 60 ans pour obtenir une forêt de pins spontanée. Sur la base des valeurs des peuplements de référence, les stocks de carbone devraient être d'environ 1,4 tC ha⁻¹ dans la couverture de *H. ramnoides* âgée de 5 ans et d'environ 42 tC ha⁻¹ dans les forêts de pins âgées de 100 ans.

Couvert végétal total et couvert végétal ligneux (I.3 et I.4)

Le couvert végétal et sa fraction ligneuse jouent un rôle clé dans le contrôle de l'érosion en interceptant les précipitations et en améliorant l'infiltration de l'eau, en renforçant la protection du sol et la séquestration du carbone, et sont considérés comme des indicateurs de la régulation de l'eau et de la prévention des avalanches de neige et de l'érosion du sol. En outre, on s'attend à ce que la proportion de la fraction récalcitrante du carbone du sol augmente à mesure que le couvert végétal s'étend et comprend des proportions croissantes d'espèces ligneuses (Haynes, 2000 ; Pregitzer & Euskirchen, 2004).

▪ **Méthode d'échantillonnage**

Sur les deux sites d'étude, l'échantillonnage devrait être effectué une fois par an en été, au moment du pic phénologique des plantes, et répété chaque année pendant les 5 premières années et tous les 5 ans par la suite.

Les placettes peuvent être identiques à I.1 (stock de C aérien dans les plantes) et I.2 (séquestration du CO₂ aérien dans les plantes) pour la forêt de Capet et la coupe de Santa Elena. La couverture végétale totale (y compris les herbes, les arbustes et les arbres) et la couverture végétale ligneuse (arbustes et arbres uniquement) doivent être annotées sur chaque placette. Le pourcentage de la couverture végétale totale et ligneuse sera déterminé par une estimation visuelle (sur le terrain ou à partir de photographies aériennes, si elles sont disponibles) du pourcentage en projection verticale de la canopée végétale totale et ligneuse couvrant la zone de la placette.

▪ **Évolution souhaitée des indicateurs dans le temps**

En l'absence de perturbations de forte intensité, la couverture végétale totale et ligneuse devrait augmenter de manière exponentielle jusqu'à la stabilisation finale.

Dans la forêt de Capet, il faudra environ 5 à 10 ans pour atteindre > 50 % de la couverture végétale totale et environ 30 ans pour atteindre > 50 % de la couverture végétale ligneuse. À Santa Elena, il faudra environ 3 à 5 ans pour atteindre > 50 % de la

couverture végétale totale et environ 5 à 10 ans pour atteindre > 50 % de la couverture végétale ligneuse.

Évolution de l'occupation des sols (I.5)

Les séries de cartes de la végétation ou de l'occupation du sol au fil du temps constituent un indicateur précieux de la dynamique de la végétation. Elles montrent les changements temporels dus à la succession primaire ou secondaire, à la dégradation ou à la régression, à la régénération ou à la restauration des communautés végétales (*Ichter et al.*, 2014).

▪ **Méthode de contrôle**

Des cartes de la végétation et de la couverture végétale seraient très utiles pour le suivi de ces objectifs de restauration. Une carte de la végétation (avec les types d'habitat EUNIS ; <https://eunis.eea.europa.eu>) ou une carte de l'occupation du sol (avec les unités CORINE ; <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>) des zones d'étude et des zones adjacentes devrait être créée tous les 5 ans par photo-interprétation d'images aériennes et complétée par les données de terrain obtenues lors des échantillonnages.

La carte doit inclure l'ensemble de la zone d'étude et les zones adjacentes qui peuvent influencer - ou être influencées - par le reboisement (dans la forêt de Capet) ou la stabilisation et le reboisement (dans la coupe de Santa Elena). La carte sera utile pour calculer les changements dans la végétation ou la couverture terrestre au fil du temps, pour détecter l'évolution des plantations et tout impact possible (glissements de terrain, avalanches, etc.).

▪ **Évolution souhaitée des indicateurs dans le temps**

En l'absence de perturbations de forte intensité, on s'attend à ce que le maquis de l'épine blanche (*Hippophae rhamnoides*) puis la forêt de pins recouvrent la coupure de route restaurée à Santa Elena. Dans des conditions similaires de faible perturbation, dans la zone de la forêt de Capet, les communautés végétales devraient évoluer avec le temps, passant de prairies reboisées à haute altitude à des arbustes et à des forêts de pins. En outre, si les avalanches sont minimisées par des plantations d'arbres, les couloirs d'avalanche "cicatriseront" et passeront progressivement d'arbustes ou de jeunes arbres à une forêt mature.

Le taux de changement souhaité pour les communautés est le même que pour les indicateurs I.3 (*couvert végétal total*) et I.4 (*couvert végétal ligneux*).

Mortalité et croissance des jeunes plants (I.6)

▪ **Méthode d'échantillonnage**

Les deux sites d'étude (Santa Elena et Capet Forest) devraient être échantillonnés pour ces deux indicateurs les années 2, 4 et 6 après la fin des opérations et tous les cinq ans par la suite. L'échantillonnage devrait être effectué à la fin du printemps ou en été, lorsqu'il n'y a pas de neige et qu'il y a plus d'heures d'ensoleillement.

Dans la forêt de Capet, tous les jeunes arbres ont été inventoriés juste après la plantation. Pour le suivi, une plantation tripode sur 4 (grand ou petit collecteur) doit être choisie au hasard. Dans chaque collecteur (unités de plantation sous trépieds), le nombre de jeunes arbres morts par espèce sera enregistré et, pour chaque jeune arbre vivant, le diamètre de la tige (mesuré à l'aide d'un pied à coulisse à 5 cm au-dessus de la base de la tige) et la hauteur (à l'aide d'un mètre ruban) seront mesurés.

A Santa Elena, tous les jeunes arbres plantés doivent être inventoriés à la fin des opérations, immédiatement après la plantation. Pour chaque jeune arbre, l'inventaire comprendra le nom de l'espèce, le diamètre (mesuré à l'aide d'un pied à coulisse à 5 cm au-dessus de la base de la tige) et la hauteur (à l'aide d'un ruban à mesurer). Pour le suivi, tous les jeunes arbres doivent être revus pour mesurer leur diamètre et leur hauteur, en notant les spécimens morts.

Sur les deux sites, et pour chaque campagne d'échantillonnage, la valeur moyenne du diamètre à la base et la valeur moyenne de la hauteur de toutes les plantules vivantes (par espèce) doivent être calculées (dans la forêt de Capet, ce calcul sera effectué séparément pour chaque collecteur). L'augmentation moyenne du diamètre et de la hauteur par collecteur et par espèce sera obtenue en comparant deux campagnes d'échantillonnage successives divisées par le temps (en années) qui s'est écoulé entre elles.

Le taux de mortalité (en %) par espèce (et par collecteur dans la forêt de Capet) sera calculé comme le rapport entre le nombre de jeunes arbres morts et le nombre de jeunes arbres vivants de la campagne d'échantillonnage précédente. Dans la forêt de Capet, le taux de mortalité moyen par espèce sera obtenu en faisant la moyenne des valeurs de tous les collecteurs.

▪ **Évolution souhaitée des indicateurs dans le temps**

Les jeunes arbres plantés devraient favoriser l'intégration des zones travaillées avec les communautés végétales couvrant les montagnes de référence adjacentes.

La mortalité des jeunes arbres plantés doit être réduite au minimum. À ce jour, aucune donnée n'est disponible sur la mortalité des jeunes arbres ou sur les courbes de croissance des espèces plantées dans la région, ce qui rend impossible l'établissement de valeurs souhaitables dans le temps pour l'un ou l'autre de ces deux indicateurs. Par conséquent, les données issues de ce processus de suivi seraient très utiles pour évaluer les futurs plans de restauration des plantations dans la région.

Espèces envahissantes (I.7)

La richesse des espèces végétales non indigènes (exotiques) est négativement liée aux gradients altitudinaux dans le monde entier, et les espèces invasives (espèces qui concurrencent fortement les espèces indigènes et peuvent altérer les propriétés des écosystèmes) sont rares dans les ceintures montagnardes et subalpines des chaînes de montagnes européennes. Cependant, les impacts et les perturbations anthropiques (routes, zones urbanisées, stations de ski, travaux de terrassement, etc.) influencent positivement l'invasion de plantes non indigènes le long des gradients d'altitude et dans

les écosystèmes de montagne (Alexander *et al.*, 2016 ; Clements *et al.*, 2022). Les activités de restauration, telles que le reboisement et la stabilisation du terrain, peuvent créer des perturbations à court terme qui peuvent être exploitées par les espèces non indigènes pour coloniser et se propager dans les habitats restaurés et leurs environs.

Une fois établies, même en petites proportions, les espèces envahissantes sont très difficiles à éradiquer et peuvent avoir des effets négatifs importants sur les écosystèmes naturels et le bien-être socio-économique et humain.

▪ **Méthode d'échantillonnage**

Sur les deux sites d'étude, l'échantillonnage devrait être effectué une fois par an en été, au moment de la floraison, et répété chaque année pendant les cinq premières années (lorsque la probabilité d'apparition d'espèces exotiques est plus grande).

Dans la forêt de Capet, la surveillance des plantes envahissantes devrait nécessiter une inspection visuelle de tous les collecteurs afin de déterminer la présence d'espèces envahissantes.

À Santa Elena, toutes les terrasses doivent faire l'objet d'une inspection visuelle (à pied, à l'aide de jumelles ou par drone) afin de déterminer la présence d'espèces envahissantes.

Dans les deux cas, l'indicateur d'invasion végétale sera exprimé comme le nombre total d'espèces végétales envahissantes dans chaque campagne de surveillance.

▪ **Évolution souhaitée des indicateurs dans le temps**

A court terme, la probabilité d'établissement des espèces invasives dépend principalement de la proximité des propagules et de l'intensité des perturbations de l'habitat colonisable. Dans tous les cas, la probabilité de présence d'espèces invasives est faible les premières années, et nulle à moyen et long terme.

Drapeaux d'alerte et recommandations en cas d'alerte

Dans la forêt du Capet, le suivi annuel des jeunes arbres réalisé ces dernières années (2017-2020) a montré que la mortalité était faible (<4%), et qu'elle diminuait d'année en année. Il est donc probable qu'aucune plantation de renforcement ne soit nécessaire à l'avenir. Toutefois, pour garantir une plus grande diversité d'arbres et un meilleur couvert végétal, il convient d'analyser les éventuelles différences de mortalité par espèce. A moins qu'une avalanche de neige ne détruise partiellement un collecteur, des plantations de renforcement ne seraient probablement pas nécessaires.

A Santa Elena, au moment de la rédaction de ce plan de surveillance, il n'y a pas de données sur la croissance et la mortalité des plantes car la coupe de route n'a pas encore été reboisée. Si la survie des plantes est très faible, une nouvelle plantation de renforcement devrait être planifiée. Le suivi annuel des taux de survie, du pourcentage de couverture totale et ligneuse, et de la croissance des jeunes arbres restants par espèce permettra de tirer des conclusions sur les espèces les plus appropriées pour la restauration, au cas où des plantations de renforcement devraient être effectuées à l'avenir. Dans le cadre de la surveillance future, dans un délai de 5 à 6 ans et chaque année à la fin du printemps ou au début de l'été, il est conseillé de remplacer

l'échantillonnage sur le terrain par un vol de drone afin d'évaluer les changements dans le couvert végétal ligneux.

Sur les deux sites d'étude, l'apparition de plus de deux espèces exotiques ou la présence d'une (ou plusieurs) espèce(s) à propagation rapide susceptible(s) de concurrencer les jeunes plants nécessitera l'enlèvement rapide de tous les spécimens d'espèces exotiques ou envahissantes ainsi que des programmes d'éradication.

3.3.4 Indicateurs de sol

La surveillance des sols devrait être programmée pour coïncider avec la surveillance des plantes, les années 2, 4 et 6 après la fin des opérations, puis tous les cinq ans, à la fois à Santa Elena et dans la forêt de Capet. Les campagnes d'échantillonnage doivent être menées de préférence au printemps, lorsque l'activité du sol et des plantes est élevée.

Pour tous les indicateurs, les échantillons de sol doivent être prélevés dans les mêmes parcelles que celles destinées à la surveillance des plantes. Dans la forêt de Capet, une sous-placette carrée de 1m² sera délimitée au centre de chacune des 32 placettes d'échantillonnage sélectionnées pour le suivi des plantes (cf. 3.3.1 (a)), et tous les échantillons de sol seront prélevés dans cette zone. À Santa Elena, les 5 mêmes terrasses sélectionnées pour la surveillance des plantes seront échantillonnées pour le sol. Sur chacune de ces terrasses, trois sous-parcelles carrées de 1m² seront délimitées à 10 m les unes des autres, en commençant par le centre de chaque terrasse (15 sous-parcelles au total). Le matériel nécessaire à l'extraction des échantillons sera spécifique à chaque indicateur.

Caractérisation générale du sol, particulièrement applicable aux sites de Capet Forest et de Santa Elena

Une analyse détaillée des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol a été réalisée dans la forêt de Capet dans le cadre de la description de l'état de référence du site, avant la mise en œuvre de la NBS.

Une description similaire a été faite pour les sols de la tranchée de Santa Elena et des zones forestières non perturbées environnantes (les données sont disponibles auprès de la même source) avant le début des opérations. Cependant, contrairement à la forêt de Capet, où les sols naturels n'ont pas été perturbés par les travaux, le sol naturel a été détruit lors de la stabilisation de la tranchée de Santa Elena, et les boîtes de plantation nouvellement créées ont été remplies de matériaux et d'agrégats calibrés surmontés d'une couche de terre végétale dont les caractéristiques et l'origine ne sont pas déterminées. Dans le meilleur des cas, ce mélange pourrait évoluer vers un substrat raisonnable permettant la croissance des plantes et, beaucoup plus tard, vers un "technosol" dont les caractéristiques pourraient être compatibles avec celles des sols environnants après de nombreuses années.

Dans tous les cas, ce mélange de matériaux devrait être caractérisé dès que possible après la fin des opérations pour aider à interpréter l'évolution de la végétation plantée et pour surveiller la formation potentielle de sol dans les bacs de plantation qui couvrent

maintenant la tranchée de la route. Pour cette caractérisation, les 5 mêmes terrasses sélectionnées pour le suivi des plantes doivent être échantillonnées pour le sol. Deux points d'échantillonnage doivent être marqués sur chacune des cinq terrasses, à 10 m l'un de l'autre au centre de la terrasse. A chaque point d'échantillonnage, les matériaux du sol seront échantillonnés à deux profondeurs (0-15 cm 20-35 cm) à l'aide d'une tarière (Figure 3-10). Les échantillons doivent être envoyés dans des sacs en plastique scellés et correctement étiquetés à des laboratoires d'experts en sols pour être analysés pour la texture, la capacité de rétention d'eau, le carbone total et organique, l'azote total, le phosphore disponible, les principaux cations, le pH, la capacité d'échange de cations et la conductivité électrique.

Teneur en carbone organique du sol (I.8) et piégeage du carbone dans le sol (I.9)

La perte de carbone organique du sol est l'un des principaux facteurs de dégradation de l'environnement en Europe, et l'inversion de cette tendance figure parmi les priorités de la Commission européenne, tant dans les environnements agricoles que dans les forêts. La matière organique du sol joue un rôle central dans le maintien des fonctions clés du sol et constitue un déterminant essentiel de la fertilité du sol et de sa résistance à l'érosion (EC, 2002).

La teneur en carbone du sol (une quantité) et le piégeage du carbone dans le sol (un processus) sont deux choses différentes. La teneur en carbone du sol peut être mesurée directement à partir d'échantillons de sol. Comme pour le carbone aérien, la séquestration du carbone dans le sol est calculée par la différence de teneur en carbone du sol entre deux dates d'échantillonnage consécutives.

Le piégeage du carbone est plus difficile à surveiller dans le sol qu'en surface parce que les changements dans la teneur en carbone du sol sont lents et parce que le carbone peut migrer verticalement dans le profil du sol et échapper à l'évaluation lorsque l'on ne travaille qu'avec les couches les plus hautes.

▪ **Méthode d'échantillonnage et d'analyse**

Tous les échantillons doivent être prélevés en l'état à l'aide de carottes de sol de dimensions connues, de préférence de 5 cm de diamètre (ou à l'intérieur, selon la forme de la carotte) et toujours à 15 cm de profondeur (Figure 3-10).



Figure 3-10. Échantillonnage du sol à l'aide de deux types de carottiers de section carrée (5 x 5 cm de côté) ou circulaire (5 cm de diamètre) de 15 cm de long. Les deux types de carottiers peuvent être ouverts dans le sens de la longueur pour obtenir des échantillons de sol non perturbés d'un volume constant connu.

▪ Évolution souhaitée des indicateurs dans le temps

La teneur en carbone du sol devrait augmenter au fur et à mesure que le sol restauré mûrit en équilibre avec la végétation introduite, ce qui signifie que le CO₂ est séquestré sous terre.

- Dans la forêt de Capet, 100 ans après la mise en œuvre de la NBS, la teneur en carbone organique du sol devrait être d'environ 20 %.
- À Santa Elena, 5 ans après la stabilisation, la teneur en carbone organique du sol devrait être d'environ 5,5 % sous une couverture végétale buissonnante. 60 ans plus tard, sous une forêt de pins, la teneur en C du sol devrait être d'environ 10 %.

Le taux de piégeage du carbone dans les sols (comme expliqué pour les plantes) peut être obtenu en divisant la différence mesurée entre deux dates d'échantillonnage par le nombre d'années écoulées depuis la dernière date d'échantillonnage.

Indice de qualité biologique du sol (SBQ) (pour les microarthropodes du sol) (I.10)

L'abondance et la biodiversité des organismes souterrains sont impressionnantes. Si l'on considère uniquement les invertébrés du sol, 1 m² de sol peut abriter entre 12 000 et 311 000 enchytraeids, 1 à 5 x 10⁴ collembolans, et 1 à 10 x10⁴ acariens oribatides (Bardgett & Van Der Putten, 2014) parmi d'autres groupes moins abondants. La faune du sol joue un rôle clé dans le maintien de la santé et de la multifonctionnalité du sol, ainsi que dans la fourniture de services écosystémiques par le biais de processus tels que le déchetage, la translocation et la décomposition de la matière organique, la formation de la structure du sol, la régulation de l'eau et le cycle des nutriments (Menta *et al.*, 2020). L'évaluation de l'ensemble de la diversité des sols au niveau des espèces est pratiquement impossible dans la pratique, car nous préférons travailler au niveau des groupes fonctionnels ou des traits fonctionnels (Figure 3-11). Certains de ces groupes sont très bien adaptés à des conditions souterraines spécifiques et sont donc très sensibles aux changements de la qualité du sol (Delgado-Baquerizo *et al.*, 2020).

▪ **Méthode d'échantillonnage et d'analyse**

Les microarthropodes du sol doivent être extraits d'échantillons de sol non perturbés (voir Figure 3-10 pour les carottiers adéquats) de 5 cm de diamètre et de 15 cm de long en utilisant des batteries d'entonnoirs de Berlese (Figure 3-12). Chaque échantillon de sol est placé sur un tamis (maille égale à 2 mm) au sommet d'un entonnoir et une ampoule à incandescence (40-60 watts) est placée à environ 30 cm au-dessus de l'échantillon. Au fur et à mesure que l'échantillon se dessèche, les animaux du sol sont incités à se déplacer vers le bas, ce qui les fait finalement tomber à travers le tamis dans un récipient contenant une solution de conservation généralement composée de 75 % d'alcool mélangé à de l'eau ou à du glycérol. Le processus d'extraction peut durer environ 7 jours. Les entonnoirs actifs doivent être protégés des courants d'air en les plaçant dans des pièces fermées.

Un indice différent peut être calculé à partir de l'observation, de la classification et du comptage des spécimens extraits à différents niveaux de résolution (allant du nombre total de spécimens au nombre de spécimens d'une espèce particulière) sous un stéréomicroscope.

Pour surveiller l'effet de l'application du NBS sur la biodiversité des microarthropodes du sol à Santa Elena et dans la forêt de Capet, nous proposons de calculer l'indice SBQ.



Figure 3-11. Quelques exemples des divers morphotypes d'acariens du sol (dans le cercle ; D.E. Walter, <https://beta.abmi.ca/biobrowser/species-group/mites-intro.html>) et de collemboles (dans les rectangles ; Andy Murray, <https://www.chaosofdelight.org>)



Figure 3-12. Entonnoirs de Berlese utilisés pour extraire des microarthropodes d'échantillons de sol non perturbés. Source : http://soilbugs.massey.ac.nz/collection_berlese.php

Tous les spécimens extraits sont observés à l'aide d'un stéréomicroscope et identifiés au niveau de l'ordre, à l'exception des Collembola, Diplura, Protura et Myriapoda - au niveau de la classe -, et des Acari - au niveau de la sous-classe. Une valeur IEM (indice éco-morphologique) est ensuite attribuée à chaque groupe. L'indice osseux qualitatif

(QBI) est calculé en additionnant toutes les valeurs EMI. Tous les détails concernant le calcul de l'indice QBI sont disponibles sur Parisi *et al.* (2005) et Menta *et al.* (2018) .

L'indice SBQ part du principe que plus la qualité du sol est élevée, plus le nombre de groupes de microarthropodes bien adaptés aux habitats du sol est important. L'adaptation peut donc être évaluée à partir de la présence de diverses caractéristiques morphologiques, notamment la réduction ou la perte de la pigmentation et des organes visuels, la réduction des appendices (par exemple, les antennes ou les pattes), l'amincissement de la cuticule, l'absence d'organes adaptés au saut, etc.

▪ **Évolution souhaitée des indicateurs dans le temps**

Au fur et à mesure que le système restauré mûrit et que la qualité du sol s'améliore, la valeur du SBQ devrait augmenter.

Les microarthropodes du sol ont été extraits d'échantillons prélevés dans les systèmes de référence du sol de la zone de Santa Elena et de la forêt de Capet lors de l'évaluation de la qualité de base du sol avant la mise en œuvre du NBS. Les résultats peuvent fournir des valeurs de référence et des taux de changement pour les deux études de cas.

Diversité taxonomique et fonctionnelle des microbes du sol (I.11)

Les communautés microbiennes du sol jouent un rôle essentiel dans les écosystèmes terrestres en réintégrant les nutriments essentiels dans les cycles biogéochimiques, en régulant la qualité de l'atmosphère et de l'hydrosphère, en renforçant la résistance des plantes et en influençant la composition des communautés végétales en modifiant les relations de concurrence entre les espèces (Nannipieri *et al.*, 2003). La diversité des fonctions remplies par les micro-organismes dans les écosystèmes a été reconnue comme le chaînon manquant entre les schémas de biodiversité et les fonctions des écosystèmes. Il est de plus en plus admis que les modèles de diversité fonctionnelle peuvent constituer un test théorique plus puissant que la richesse taxonomique.

Parmi les diverses approches analytiques de la diversité microbienne du sol (Orgiazzi *et al.*, 2015), l'analyse métagénomique est un outil puissant pour étudier les capacités fonctionnelles des microbes du sol. Parmi les techniques métagénomiques disponibles, le "Shotgun Metagenome Sequencing" révèle le profil taxonomique (diversité et abondance) ainsi que les attributs fonctionnels des communautés microbiennes du sol. L'analyse fonctionnelle des gènes fait partie de la liste des indicateurs puissants permettant de surveiller la biodiversité des sols et la fonction des écosystèmes dans toute l'Europe.

▪ **Méthode d'échantillonnage et d'analyse**

Les analyses métagénomiques sont effectuées par des sociétés spécialisées qui doivent être contactées suffisamment tôt avant les campagnes d'échantillonnage pour convenir de l'envoi des échantillons de sol en toute sécurité. L'entreprise doit être tenue de fournir un traitement bioinformatique des données brutes.

Des échantillons de sol (environ 40 gr chacun) sont prélevés dans les 15 premiers centimètres du sol à l'aide de kits d'échantillonnage individuels stériles (idéalement ceux

utilisés en médecine pour les analyses de selles), Figure 3-13) afin d'éviter toute contamination croisée entre les échantillons, et conservés au réfrigérateur jusqu'à ce qu'ils soient envoyés rapidement au laboratoire. Si l'envoi n'est pas immédiat, les échantillons doivent être conservés à une température inférieure à -20°C.



Figure 3-13. Kit d'échantillonnage (cuillère et récipient stériles) pour les échantillons de sol destinés aux analyses de l'ADN microbien.

Il est recommandé de procéder à des analyses rapides pour que les données de surveillance soient comparables à celles produites lors de l'évaluation de base dans les deux études de cas.

- **Évolution souhaitée des indicateurs dans le temps**

Malgré sa grande valeur diagnostique, cet indicateur n'est pas facile à interpréter en l'absence d'experts. La composition fonctionnelle du microbiote du sol devrait converger vers celle décrite pour les systèmes de référence lors de l'évaluation de base sur les deux sites d'étude (Figure 3-14).

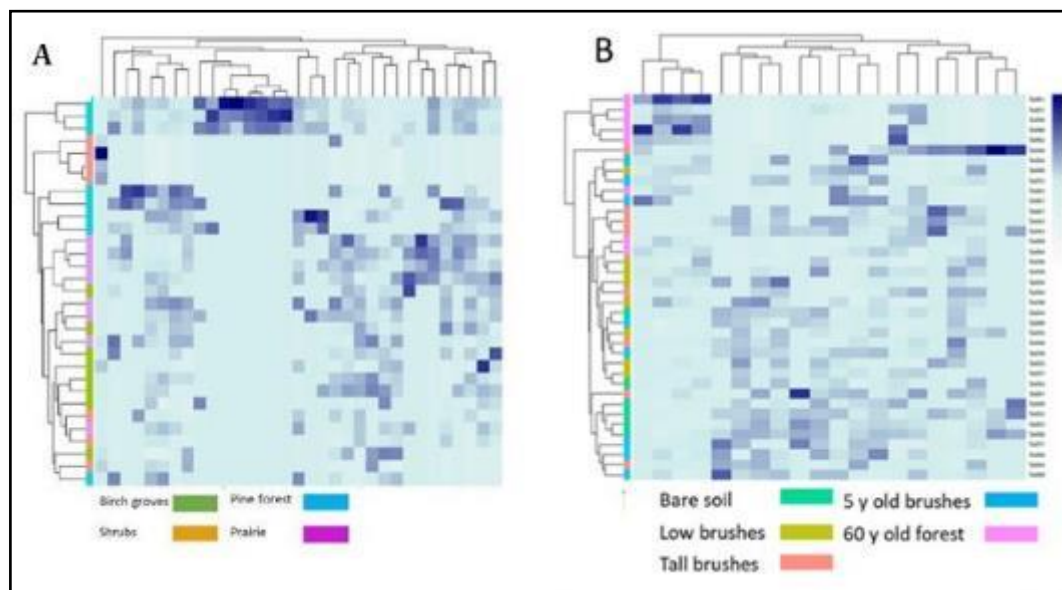


Figure 3-14. Caractérisation de la communauté microbienne du sol sous différentes communautés végétales dans les sites de Capet Forest (A) et de Santa Elena (B) lors de l'évaluation de la base de référence préopérationnelle.

3.3.5 Recommandations concernant la surveillance des sols sur les sites de Capet Forest et de Santa Elena

Le suivi est un élément essentiel des projets NBS dans le cadre d'une gestion adaptative, car il permet de détecter les écarts potentiels de l'environnement concerné par rapport à l'évolution souhaitée. Le suivi permet également d'apprendre par essais et erreurs, ce qui est le seul moyen d'améliorer progressivement les pratiques.

Le suivi est également nécessaire pour progresser vers les normes et certifications NBS, dont l'absence est l'un des principaux obstacles à l'adoption généralisée des NBS.

Les programmes de suivi exigent la mesure d'indicateurs spécifiques avant la mise en œuvre d'une NBS, et sur une base régulière longtemps après sa mise en œuvre. Cela signifie que le plan de suivi doit être intégré dans le cycle du projet des SNB dès le départ (y compris dans la phase de planification) et qu'il doit être discuté avec tous les acteurs sociaux invités aux activités de communication menées dans les Living Labs.

Le suivi a des coûts associés, en particulier lorsque des indicateurs environnementaux sont inclus. Par conséquent, les coûts du suivi doivent être inclus dans le budget du projet et la responsabilité du suivi à long terme doit être clarifiée et garantie.

4 Recommandations pour la mise en œuvre des NBS

Les deux tableaux suivants détaillent les recommandations pour les techniciens (Tableau 4-1) et les politiciens (Tableau 4-2), en suivant la méthodologie décrite dans le sous-chapitre 3.1.3. Ces recommandations sont destinées à être prises en compte lors de l'examen des SNG visant à réduire les risques naturels présents dans les zones de montagne, et à faciliter le processus de prise de décision.

4.1 Destiné aux techniciens travaillant dans le domaine de la gestion des risques

Étapes	Recommandations
Acquisition de données de base	▪ Dans la mesure du possible, utiliser des outils tels que le LIDAR pour acquérir des données et des informations exhaustives, en plus de l'imagerie optique. ▪ Essayez d'obtenir des données complètes, actualisées et précises. ▪ Mettre en place des outils efficaces de collecte, de stockage et de partage de l'information afin d'optimiser les investissements dans la collecte de données (données qui peuvent être utilisées pour toutes les politiques publiques - gestion des risques, aménagement du territoire, protection de l'environnement, planification urbaine, tourisme...), et d'obtenir une modélisation de qualité. ▪ Pensez à mettre en place des outils d'alerte permettant la remontée rapide d'informations géolocalisées en provenance du terrain.
Modélisation des risques	▪ Mettre en œuvre une modélisation qui utilise des outils innovants tels que le Lidar et des logiciels de modélisation innovants. ▪ Veiller à produire des tableaux clairs, explicites et compréhensibles pour les élus et les autorités, en faisant la distinction : ○ Tous les paramètres théoriquement nécessaires à une modélisation précise et de qualité. ○ Paramètres accessibles (expliquant l'impact sur la qualité des résultats des données manquantes, lissées ou agrégées). ▪ Expliquer clairement les limites des modèles et l'impact sur les responsabilités des élus et des autorités de gestion.
Modélisation des risques	▪ Effectuer des analyses quantitatives des risques. ▪ Expliquer aux élus la notion de risque avec tous ses éléments. Être vigilant sur les concepts, et en particulier sur la notion de vulnérabilité (vulnérabilité physique des éléments exposés et intégration de la vulnérabilité systémique -en particulier- pour les réseaux routiers). ▪ Discuter avec les élus des concepts de risque résiduel, de risque acceptable, de risque individuel et de risque sociétal. ▪ Faire apparaître clairement l'interdépendance entre le niveau de protection/coût/liberté et les contraintes sur le territoire. ▪ Rappeler que les NBS n'interviennent en principe que sur l'élément de danger (réduction du danger), mais pas sur la vulnérabilité des éléments exposés, ni sur l'exposition à ces éléments.

Étapes	Recommandations
Détermination des zones géographiques où le NBS sera mis en œuvre et premières évaluations	- Fournir des données quantifiées sur le niveau de risque afin d'identifier les domaines prioritaires pour la réduction des risques. - Identifier les secteurs où le NBS apportera des résultats significatifs (notamment en ce qui concerne l'intensité des risques et la possibilité de réduire efficacement ces risques - fréquence et/ou intensité). - Identifier les types de solutions qui sont, en principe, adaptées au type de danger à traiter. Rappeler que les NBS ne s'opposent pas aux solutions grises. Ils peuvent, selon le cas, être utilisés seuls ou en complément des solutions grises. Les deux (NBS et solutions grises) ont besoin d'ingénierie à des degrés variables.
Conception et dimensionnement des NBS	- Mobiliser des compétences de haut niveau pour concevoir et dimensionner des structures performantes. - Intégrer les contraintes des ressources et des compétences locales dans la conception des ouvrages. Il est essentiel de placer les matériaux mobilisables localement (d'une part pour réduire l'empreinte carbone et d'autre part pour favoriser le développement économique local) comme un paramètre d'entrée pour la conception et le dimensionnement, et non comme un paramètre à adapter à la conception et au dimensionnement. En d'autres termes, il est préférable de mobiliser des matériaux éventuellement de moindre qualité et d'adapter la conception des NBS (et leur entretien associé), plutôt que d'imposer des matériaux de meilleure qualité et de les transporter sur de longues distances.
Validation des NBS	- Effectuer une validation préliminaire des NBS à 4 niveaux : - Validation théorique (calcul) par un organisme compétent (université, bureau de contrôle agréé...). - Validation sur un modèle réduit ou un modèle réel en laboratoire (cf. modélisation réalisée à l'Université de Madrid dans le cadre du projet PHUSICOS). - Validation en grandeur réelle sur un site d'essai. - Validation sur un site grandeur nature sur un site expérimental "naturel". Mobiliser des sites d'essais comme celui mis en place à l'EIFORSA dans le cadre du projet PHUSICOS (plate-forme d'essais pour les ouvrages de protection contre les chutes de pierres, pour le dimensionnement des ouvrages de soutènement...). Mobiliser des sites d'expérimentation grandeur nature comme celui mis en place sur la commune de Laruns (Gourzy) dans le cadre du projet PHUSICOS pour les chutes de blocs (rôle de la forêt et des ouvrages de protection).
Mise en œuvre opérationnelle des NBS sur le terrain	- Réaliser les travaux conformément aux spécifications indiquées dans le projet détaillé. - Mobiliser au maximum les compétences locales. - Listez toutes les contraintes et les difficultés, les impossibilités ou les adaptations afin de recevoir un retour d'information plus tard. - Mettre en œuvre toutes les solutions dans le respect des règles de sécurité. - Structurer la mise en œuvre opérationnelle avec le plan de communication du projet.

Étapes	Recommandations
	▪ Vérifier la cohérence de la mise en œuvre des solutions avec les cycles végétatifs.
Retour d'information sur la mise en œuvre des NBS	▪ Obtenir un retour d'information complet sur la mise en œuvre des NBS, tant sur les aspects techniques et financiers que sur les aspects administratifs et de planification, lors d'un séminaire de clôture avec toutes les parties prenantes. ▪ Identifier les écarts et les changements par rapport aux objectifs initiaux et mesurer (quantifier) les impacts. ▪ Mettre à disposition toutes les données acquises et structurer les données géographiques dans le SIG des communautés. ▪ S'assurer que toutes les données sont numérisées pour être partagées et ainsi contribuer à la capitalisation des connaissances sur les territoires. ▪ Mettre à jour tous les indicateurs utilisés dans le diagnostic initial et procéder à une évaluation quantitative de chaque composante (risques, environnement, société et développement économique local). ▪ Compléter les bases de données sur les NBS pour enrichir et partager l'expérience acquise (cf. la base de données développée dans le cadre du projet PHUSICOS).
Définition et mise en œuvre d'un cadre de gestion et de suivi pour les SNB	▪ Définir l'ensemble des indicateurs de base qui seront contrôlés, en rapport avec : ○ Réduction des risques (réduction des dangers, réduction de l'exposition, réduction de la vulnérabilité). ○ Faisabilité technique (analyse coût-bénéfice de l'intervention, utilisation de techniques et de matériels adaptés). ○ Impact sur l'environnement et les écosystèmes (eau, sol, végétation, paysage, biodiversité). ○ Impact sur la société (qualité de vie, participation de la communauté et gouvernance, paysages et sites). ○ Impact sur l'économie locale (revitalisation des zones marginales, renforcement de l'économie locale). ▪ Contrôler ces indicateurs de base une fois que les SNB auront été mis en œuvre, en collaboration avec les institutions et les acteurs compétents, sur une base régulière et/ou après chaque événement extraordinaire. ▪ Assurer une maintenance adéquate des NBS sur une base régulière.
Définition d'un cadre de communication	▪ Produire des supports de communication clairs et innovants en mobilisant tous les médias (documents, vidéo, applications numériques, jeux de rôle, visites de terrain, ateliers d'expérimentation...). ▪ Organiser des séminaires/débats/conférences sous les auspices des autorités locales afin de présenter, d'expliquer et de promouvoir les NBS.

Tableau 4-1. Liste des recommandations destinées aux techniciens lors de la définition et de la mise en œuvre des SNB pour la réduction des risques naturels. En gras, figurent les recommandations communes aux techniciens et aux politiques.

4.2 Destiné aux responsables politiques chargés de la gestion des risques sur le site

Les étapes	Recommandations
Acquisition de données de base	▪ Mobiliser des financements importants (la connaissance des territoires est une nécessité pour mettre en œuvre des politiques intégrées, équilibrées et durables). ▪ Capitaliser les connaissances et les données sur la caractérisation des risques sur le territoire. ▪ Essayez d'obtenir des données complètes, actualisées et précises. ▪ Mettre en place des outils efficaces de collecte, de stockage et de partage de l'information afin d'optimiser les investissements dans la collecte de données (données qui peuvent être utilisées pour toutes les politiques publiques - gestion des risques, aménagement du territoire, protection de l'environnement, planification urbaine, tourisme...) et d'obtenir une modélisation de qualité. ▪ Pensez à mettre en place des outils d'alerte permettant la remontée rapide d'informations géolocalisées en provenance du terrain. ▪ Promouvoir le développement de systèmes d'information géographique basés sur l'informatique en nuage afin d'optimiser les investissements dans la collecte de données et de disposer d'informations actualisées, ainsi que de disposer des compétences nécessaires pour utiliser ces outils au niveau des collectivités locales. ▪ Impliquer la population dans la communication d'informations (crowd-sourcing) afin d'améliorer la culture du risque.
Modélisation des risques	▪ Comprendre la différence entre les dangers et les risques. ▪ Comprendre la différence entre les éléments du risque pour définir les bonnes actions à prendre : ○ Réduire le danger : mettre en œuvre des actions visant à réduire la fréquence et/ou l'intensité des phénomènes (notamment avec l'aide du NBS). ○ Réduire la vulnérabilité des éléments exposés : renforcer les éléments, mettre en place des réseaux de communication maillés. ○ Gérer l'exposition des éléments : par l'aménagement du territoire, la régulation des flux de véhicules, la gestion des aires de stationnement, etc. ▪ Comprendre les concepts de risque résiduel, de risque acceptable, de risque individuel et de risque sociétal. ▪ Rappeler que le NBS n'intervient en principe que sur l'élément de danger (réduction du danger), et non sur la vulnérabilité des éléments exposés ni sur l'exposition.
Détermination des zones géographiques où le NBS sera mis en œuvre et premières évaluations	▪ Définir les secteurs prioritaires et sélectionner, avec l'aide des techniciens, les solutions de réduction des risques les plus appropriées en ce qui concerne : ○ L'efficacité attendue des solutions (capacité à réduire les risques). ○ Les coûts doivent être convenus en fonction des budgets disponibles et des risques résiduels attendus.

Les étapes	Recommandations
	○ Maintenance des systèmes mis en œuvre (niveau de maintenance requis, qui doit assurer cette maintenance - les services techniques des communautés sont-ils en mesure d'assurer cette maintenance ?) ○ Les responsabilités des maires et des gestionnaires (rappelons qu'il n'existe pas de cadre réglementaire et normatif pour la plupart des ONB). ▪ Rappeler que les NBS ne s'opposent pas aux solutions grises. Ils peuvent, selon le cas, être utilisés seuls ou en complément des solutions grises. Les deux (NBS et solutions grises) ont besoin d'ingénierie à des degrés variables.
Conception et dimensionnement des NBS	▪ Discuter avec les concepteurs des NBS des ressources possibles qui peuvent être mobilisées au niveau local : type de matériaux, capacité des entreprises locales à fournir ces matériaux (quantité, délais, prix). ▪ Identifier - en amont des phases de conception et de dimensionnement - les compétences locales possibles pour mettre en œuvre les solutions et en assurer la maintenance. ▪ Discuter avec les concepteurs des solutions tout au long de la phase de conception et de dimensionnement pour " pré-valider " la mise en œuvre opérationnelle des solutions qui auront été définies : matériaux, compétences locales, contraintes administratives locales, approvisionnement et code des marchés publics.
Validation des NBS	▪ Encourager la mise en place et la pérennisation de sites d'expérimentation (ex : Gourzy sur la commune de Laruns). ▪ Mobiliser des sites d'essais comme celui mis en place à EIFORSA dans le cadre du projet PHUSICOS (plate-forme d'essais pour les ouvrages de protection contre les chutes de pierres, pour le dimensionnement des ouvrages de soutènement...). ▪ Mobiliser des sites d'expérimentation grandeur nature comme celui mis en place sur la commune de Laruns (Gourzy) dans le cadre du projet PHUSICOS pour les chutes de blocs (rôle de la forêt et des ouvrages de protection).
Mise en œuvre opérationnelle des NBS sur le terrain	▪ Mobiliser l'ensemble des acteurs (collectivités locales, Etat, parcs naturels, gestionnaires de réseaux, ...) pour lever toutes les contraintes administratives et éviter les retards dans la mise en œuvre des solutions <i>in situ</i>. ▪ Mettre en place des groupes de travail en amont pour identifier ces contraintes, trouver des solutions opérationnelles et limiter les conflits et les blocages. ▪ Définir des spécifications et des dossiers de consultation "raisonnables" pour les entreprises. ▪ Encourager les entreprises locales à rejoindre des consortiums pour la mise en œuvre opérationnelle des NBS et la maintenance ultérieure.
Retour d'information sur la mise en œuvre des NBS	▪ Obtenir un retour d'information complet sur la mise en œuvre des NBS, tant sur les aspects techniques et financiers que sur les aspects administratifs et de planification, lors d'un séminaire de clôture avec toutes les parties prenantes. ▪ Identifier les écarts et les changements par rapport aux objectifs initiaux et mesurer (quantifier) les impacts. ▪ Mettre à disposition toutes les données acquises et structurer les données géographiques dans le SIG de la commune ou de la région.
Définition et mise en œuvre d'un cadre de	▪ Établir un cadre pour la gestion et le suivi des SNB, afin de déterminer :

Les étapes	Recommandations
gestion et de suivi pour les SNB	○ La fréquence et les modalités de suivi des travaux. ○ Les critères et modalités d'entretien des ouvrages (qui fait quoi et quand) en intégrant les aspects budgétaires et financiers. ○ Critères et modalités de suppression des structures de l'ONB (qui fait quoi et quand), intégrant les aspects budgétaires et financiers si ces structures s'avèrent inutiles ou déficientes, ou si elles sont susceptibles d'accroître les risques ou de dégrader l'environnement. ○ La définition des responsabilités et des obligations de chacune des parties prenantes (collectivités, Etat, organismes publics, techniciens, entreprises). ○ Mise à jour des indicateurs de diagnostic (risques, environnement, société et développement économique local), en définissant les fréquences et les acteurs à mobiliser ainsi que les actions à entreprendre en cas d'évolution non souhaitée ou indésirable d'un ou plusieurs indicateurs. Remarque : ce cadre de gestion et de suivi peut être l'occasion de co-construire des stratégies intégrées de gestion des risques, de développement territorial et de protection de l'environnement (telles que la gestion intégrée des risques naturels et de la sylviculture) entre toutes les parties prenantes.
Définition d'un cadre de communication	▪ Définir toutes les actions de communication, les moyens nécessaires et les objectifs pour informer, sensibiliser et impliquer toutes les parties prenantes, en particulier la population locale. ▪ Mettre en place un système de gouvernance pour renforcer l'acceptabilité des solutions proposées et identifier les éventuels points de blocage. Note : ce cadre de communication doit être mis en place dès le début des projets de mise en œuvre des SNB et est transversal à toutes les étapes présentées ci-dessus. Cette communication vise également à faire comprendre à toutes les parties prenantes les enjeux des NBS, leur intérêt, leurs limites et leurs contraintes. Il s'agit notamment d'expliquer les notions de risque avec l'équilibre à trouver entre protection, développement et coûts.

Tableau 4-2. Liste des recommandations destinées aux politiciens lors de la définition et de la mise en œuvre des SNB pour la réduction des risques naturels. En gras, figurent les recommandations communes aux techniciens et aux politiques.

5 Références

Alexander, J. M., Lembrechts, J. J., Cavieres, L. A., Daehler, C., Haider, S., et al. (2016). Invasions végétales dans les montagnes et les écosystèmes alpins : état actuel et défis futurs. *Alpine Botany* 126, 89-103.

- Bardgett, R. D., Van Der Putten, W. H. (2014). Biodiversité souterraine et fonctionnement des écosystèmes. *Nature* 515(7528), 505.
- Begemann, W. et H. M. Schiechl (1994) Ingenieurbiologie, Handbuch zum ökologischen Wasser- und Erdbau, 2. Auflage. Bauverlag, Wiesbaden.
- Clements, D. R., Upadhyaya, M. K., Joshi, S., Shrestha, A. (Eds.). (2022). Global Plant Invasions. Springer.
- Delgado-Baquerizo, M., Reich, P. B., Trivedi, C., Eldridge, D. J., Abades, S., et al. (2020). Multiple elements of soil biodiversity drive ecosystem functions across biomes. *Nature Ecology & Evolution* 4, 210-220.
- Doran J.W. (2002). Soil health and global sustainability : translating science into practice (Santé des sols et durabilité globale : traduire la science en pratique). *Agriculture, Ecosystems and Environment* 88, 119-127.
- Dorren, L.K.A. (2012). Rockyfor3D (v5.0) revealed - Transparent description of the complete 3D rockfall model. ecorisQ paper (International Association for Natural Hazard Risk Management), www.ecorisq.org : 30 p
- CE (2002) Vers une stratégie thématique pour la protection des sols. COM (2002) 179 final.
- AEE (2023) Surveillance des sols en Europe Indicateurs et seuils pour l'évaluation de la santé des sols. Agence européenne pour l'environnement. Office des publications de l'Union européenne. Luxembourg.
- Fundació Privada de l'Enginyeria Agrícola Catalana (AEIP) (2012). NTJ 12S Parte 1 Obras de bioingeniería del paisaje : Técnicas de protección superficial del suelo. www.ntjdejardineria.org.
- Fundació Privada de l'Enginyeria Agrícola Catalana (AEIP) (2013). NTJ 12S Parte 2 Obras de bioingeniería del paisaje : Técnicas de estabilización de suelos.
- Fundació Privada de l'Enginyeria Agrícola Catalana (AEIP) (2015). NTJ 12S Parte 4 Obras de bioingeniería del paisaje : Técnicas mixtas de estabilización de taludes.
- Fundació Privada de l'Enginyeria Agrícola Catalana (AEIP) (2010). NTJ 12S Parte 5 Obras de bioingeniería del paisaje : Técnicas de revestimiento y estabilización aplicables en ámbitos fluviales.
- Haynes, R. J. (2000). Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand. *Soil Biology & Biochemistry* 32, 211-219.
- Ichter, J., Evans, D., Richard, D. (eds) (2014). Cartographie des habitats terrestres en Europe, une vue d'ensemble. Luxembourg. Rapport technique du MNHN-EEA, p 153.
- Menta, C., Conti, F. D., Pinto, S., Bodini, A. (2018). Indice de qualité biologique des sols (QBS-ar) : 15 ans d'application à l'échelle mondiale. *Indicateurs écologiques* 85, 773-780.
- Menta, C., Remelli, S. (2020). Santé des sols et arthropodes : From complex system to worthwhile investigation. *Insectes* 11, 54.
- Nannipieri, P., Ascher, J., Ceccherini, M.T., Landi, L., Pietramellara, G., Renella, G. (2003). Microbial diversity and soil functions. *European Journal of Soil Science* 68, 12-26.
- Orgiazzi, A., Dunbar, M. B., Panagos, P., de Groot, G. A., Lemanceau, P. (2015). Biodiversité des sols et codes-barres ADN : opportunités et défis. *Soil Biology and Biochemistry* 80, 244-250.
- Parisi, V., Menta, C., Gardi, C., Jacomini, C., Mozzanica, E. (2005). Microarthropod communities as a tool to assess soil quality and biodiversity : a new approach in Italy. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 105, 323-333.
- Pregitzer, K. S., Euskirchen, E. S. (2004). Carbon cycling and storage in world forests : biome patterns related to forestage. *Global Change Biology* 10, 2052-2077.

Raymond, C.M., Berry, P., Breil, M., Nita, M.R., Kabisch, N., et al. (2017). Un cadre d'évaluation d'impact pour soutenir la planification et l'évaluation des projets de solutions basées sur la nature. Un rapport du groupe de travail d'experts EKLIPSE. Centre pour l'écologie et l'hydrologie. Wallingford, Royaume-Uni.

Rodger, A.S. (1993). The carbon cycle and global forest ecosystem. *Water, Air and Soil Pollution* 70, 295-307.

Vayreda, J., Martínez-Vilalta, J., Gracia, M., Retana, J. (2012). Recent climate changes interact with stand structure and management to determine changes in tree carbon stocks in Spanish forests. *Global Change Biology* 18, 1028-1041.

6 Annexes

Annexe A

Agenda de l'événement de deux jours : journée de formation et séminaire sur les résultats.

Figure 6-1, Figure 6-2, Figure 6-3 et Figure 6-4 présentent l'agenda détaillé en français.

Figure 6-5, Figure 6-6, Figure 6-7 et Figure 6-8 présentent l'agenda détaillé en espagnol.



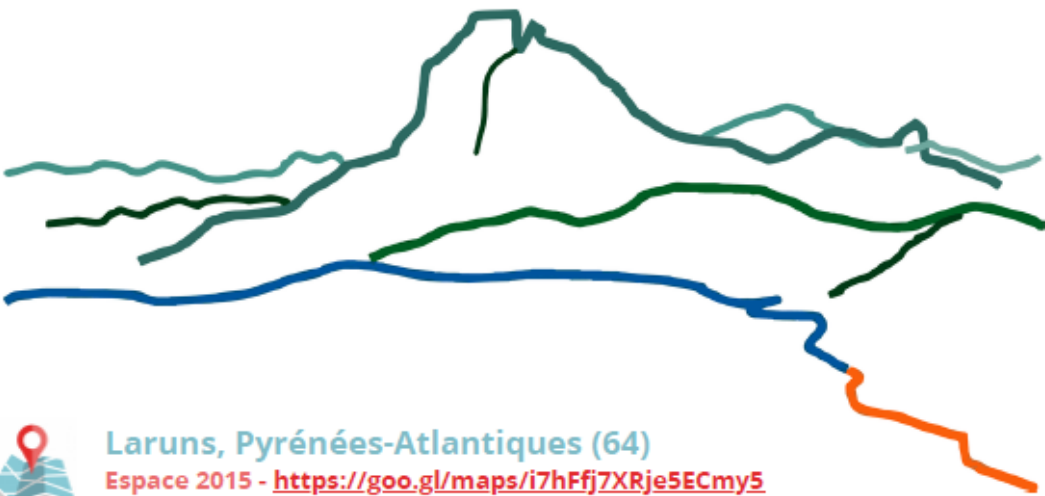


Funded by
the European Union

JOURNÉE FORMATIVE ET SÉMINAIRE DE RÉSULTATS

Solutions fondées sur la nature pour la gestion des
risques naturels et climatiques dans les Pyrénées

11 et 12 avril 2023





Laruns, Pyrénées-Atlantiques (64)
Espace 2015 - <https://goo.gl/maps/i7hFfj7XRje5ECmy5>



Retransmission par Zoom



Inscription gratuite. Places limitées !
Pauses repas et cafés incluses
<https://link.infini.fr/0ZHZFX2P>










Figure 6-1. Page 1 de l'agenda détaillé de l'événement de deux jours organisé en avril, 11th et 12th à Laruns.



JOURNÉE FORMATIVE MARDI 11 AVRIL 2023

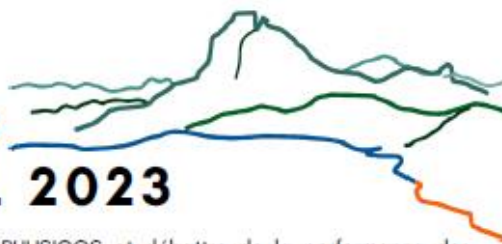
- **Objectif** : Introduire aux techniques de Génie Biologique et plus spécifiquement aux techniques en milieu montagnard.
- **Public cible** : techniciens des administrations publiques des forêts et routes; petites et moyennes entreprises des secteurs du bois et de la construction; cabinets conseils spécialisés sur les risques naturels, géotechnique, etc.


<https://us06web.zoom.us/j/83493876018?pwd=TGxvYkxMRmMxYXlRSH16FkZ3Zz0TQz09>

8:45 - 9:00	Bienvenue et inscriptions
9:00 - 9:15	Introduction sur le contexte pyrénéen, concept des solutions fondées sur la nature Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique (OPCC) de la Communauté de Travail des Pyrénées (CTP) - Didier VERGÈS
9:15 - 9:30	Introduction au contexte en Vallée d'Ossau, exploitation forestière dans les montagnes béarnaises et potentiel des Solutions fondées sur la nature (SfN) Institution Patrimoniale du Haut Béarn (IPHB) - Jean-Michel MEHL
9:30 - 10:00	Génie Biologique: une discipline fondée sur la Nature Fédération Européenne pour le Génie Biologique (EFIB) - Paola SANGALLI
10:00 - 11:00	Principales techniques de Génie Biologique pour la stabilisation des pentes Fédération Européenne pour le Génie Biologique (EFIB) - Paola SANGALLI
11:00 - 11:30	Pause café
11:30 - 12:30	Méthodologie pour le projet de stabilisation des pentes Association Espagnole d'Ingénierie du Paysage (AEIP) - Guillermo TARDÍO
12:30 - 14:00	Pause déjeuner
14:00 - 15:00	Du projet à la mise en oeuvre: exemples de projets de génie biologique pour la stabilisation de pentes Association pour le Génie Végétal (AGéBio) - Klaus PEKLO Association Espagnole d'Ingénierie du Paysage (AEIP) - Albert SOROLLA
15:00 - 15:30	Expériences et perspectives d'une entreprise locale pyrénéenne spécialisée dans le secteur du bois Explotaciones e Impregnaciones Forestales SA (EIFORSA) - Eduardo FERNÁNDEZ
15:30 - 17:30	Atelier de maquettes miniatures pour la stabilisation de pentes AEIB, EFIB et AGéBio - Paola SANGALLI, Guillermo TARDÍO, Klaus PEKLO, Albert SOROLLA
17:30 - 18:30	Mise en commun, apprentissages et conclusions finales EFIB et OPCC - Paola SANGALLI et Eva GARCÍA BALAGUER

Figure 6-2. Page 2 de l'agenda détaillé de l'événement de deux jours organisé en avril, 11th et 12th à Laruns.

SÉMINAIRE DE RÉSULTATS MERCREDI 12 AVRIL 2023



- **Objectif** : Présenter les résultats obtenus du projet PHUSICOS et débattre de la performance des solutions fondées sur la nature pour faire face aux risques naturels en zones de montagne.
- **Public cible** : autorités et techniciens des administrations publiques des forêts et routes; petites et moyennes entreprises des secteurs du bois et de la construction; cabinets conseils spécialisés sur les risques naturels, géotechnique, etc.



<https://us06web.zoom.us/j/85988352654?pwd=NHBPVXRTV3VMZG02QjBxbThibUlnZz09>

8:00 - 8:30 Bienvenue et inscriptions

8:30 - 9:00 Ouverture institutionnelle

- **Maire de la Commune de Laruns** - Robert CASADEBAIG
- **Commissaire de Massif des Pyrénées** - Delphine MERCADIER-MOURE (en ligne)
- **Président du GECT Pirineos - Pyrénées** - José-Luis SORO (tbc)
- **Directrice du Parc National des Pyrénées** - Mélina ROTH
- **Représentant technique de la Région Nouvelle Aquitaine** - Matthieu BERGÉ (tbc)

9:00 - 10:00 Concept des solutions fondées sur la nature et son importance croissante en Europe

- **Importance de la biodiversité dans les Solutions fondées sur la Nature (SfN)**
Pilar ANDRÉS PASTOR - CREAL, partenaire PHUSICOS
- **Génie biologique en zones de montagne**
Paola SANGALLI, Klaus PEKLO et Albert SOROLLA - AEIB, EFIB et AGéBio
- **Introduction à l'étude des leviers et obstacles entre SfN et solutions grises**
Au nom de IIASA, partenaire PHUSICOS

10:00 - 11:30 Expériences et leçons apprises de la mise en place des solutions fondées sur la nature pour la gestion des risques naturels en zones de montagne: Capet, Artouste, Santa Elena et Erill la Vall

- **Importance des sciences et de la modélisation des risques**
Clara LÉVY - BRGM, partenaire PHUSICOS
- **Visionnage de la vidéo du site d'Artouste**
- **Mention aux 'Living Labs' PHUSICOS dans les Pyrénées**
Xavier CARBONELL - ARC Mediación Ambiental
- **Table-ronde avec les experts techniques, modérée par Xavier CARBONELL**
Santiago FÁBREGAS REIGOSA - GECT Pirineos - Pyrénées
Alain BRUZY - Services RTM Pyrénées 64-65
Carles RAÏMAT - Geo-Hazard Advisor, KUROBA4
- **Visionnage des vidéos des sites de Capet, Santa Elena et Erill la Vall**

11:30 - 12:00 Pause café



Figure 6-3. Page 3 de l'agenda détaillé de l'événement de deux jours organisé en avril, 11th et 12th à Laruns.

SÉMINAIRE DE RÉSULTATS MERCREDI 12 AVRIL 2023

- **Objectif** : Présenter les résultats obtenus du projet PHUSICOS et débattre de la performance des solutions fondées sur la nature pour faire face aux risques naturels en zones de montagne.
- **Public cible** : autorités et techniciens des administrations publiques des forêts et routes; petites et moyennes entreprises des secteurs du bois et de la construction; cabinets conseils spécialisés sur les risques naturels, géotechnique, etc.

12:00 - 13:30

Les autorités locales et la gestion intégrée du territoire

- **Cheminement réalisé par PHUSICOS dans les Pyrénées et apprentissages**

Éric LEROI - Expert en Gestion de Risques, partenaire PHUSICOS

- **Table-ronde des élus du territoire, modérée par Éric LEROI**

Robert CASADEBAIG, Maire de Laruns

Pascal ARRIBET, Maire de Barèges

Jean-Louis NOGUÈRE, Maire de Sers

Sonià BRUGUERA, Maire de Vall de Boí

Représentant de Comarca Alto Gallego (tbc)

Représentant du Conseil Départemental 64 (tbc)

13:30 - 14:00

Conclusions du séminaire et perspectives futures

- **Représentant technique de la Région Nouvelle Aquitaine** - Matthieu BERGÉ (tbc)
- **Présidente de la Fédération Européenne pour le Génie Biologique (EFIB)** - Paola SANGALLI
- **Directeur de la Communauté de Travail des Pyrénées (CTP)** - Jean-Louis VALLS
- **Coordinatrice de l'OPCC - CTP** - Eva GARCÍA BALAGUER

14:00 - 15:00

Pause déjeuner

15:00 - 17:00

Visite (facultative) du site Artouste et des travaux de PHUSICOS (sur inscription)



Figure 6-4. Page 4 de l'agenda détaillé de l'événement de deux jours organisé en avril, 11th et 12th à Laruns.





Funded by
the European Union

JORNADA FORMATIVA Y SEMINARIO DE RESULTADOS

Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión de
riesgos naturales y climáticos en los Pirineos

11 y 12 de abril 2023





Laruns, Pyrénées-Atlantiques (64)
Espace 2015 - <https://goo.gl/maps/i7hFfj7XRje5ECmy5>



Evento retransmitido por Zoom



Inscripción gratuita. Plazas limitadas!
Pausas comidas y cafés incluidas
<https://link.infini.fr/0ZHFX2P>









Figure 6-5. Page 1 de l'agenda détaillé de l'événement de deux jours organisé en avril, 11th et 12th à Laruns (en espagnol).



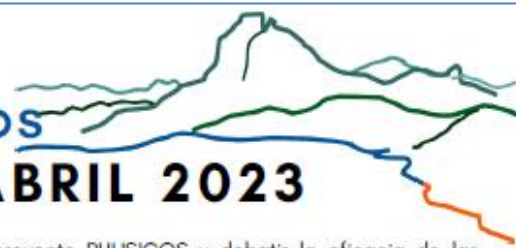
JORNADA FORMATIVA MARTES 11 DE ABRIL 2023

- **Objetivo:** Introducir las técnicas de bioingeniería y más concretamente a las técnicas en un entorno montañoso.
- **Público meta:** técnicos de administraciones públicas forestales y de carreteras; pequeñas y medianas empresas de los sectores de la madera y la construcción; consultorías especializadas en riesgos naturales, geotécnica, etc.


<https://us06web.zoom.us/j/834938760187?pwd=TFkxTGxhM0Rmc0Fvdi9hS1RFR3Zlc0E9>

8:45 - 9:00	Bienvenida e inscripciones
9:00 - 9:15	Introducción sobre el contexto pirenaico, concepto de las soluciones basadas en la naturaleza Observatorio Pirenaico del Cambio Climático (OPCC) de la Comunidad de Trabajo de los Pirineos (CTP) - Didier VERGÈS
9:15 - 9:30	Introducción al contexto del Valle de Ossau, gestión y producción forestal en las montañas de Béarn y potencial de las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) Institution Patrimoniale du Haut Béarn (IPHB) - Jean-Michel MEHL
9:30 - 10:00	Bioingeniería: una disciplina basada en la Naturaleza Federación Europea de Bioingeniería del Paisaje (EFIB) - Paola SANGALLI
10:00 - 11:00	Principales técnicas de bioingeniería para la estabilización de laderas Federación Europea de Bioingeniería del Paisaje (EFIB) - Paola SANGALLI
11:00 - 11:30	Pausa café
11:30 - 12:30	Metodología para el proyecto en la estabilización de laderas Asociación Española de Ingeniería del Paisaje (AEIP) - Guillermo TARDÍO
12:30 - 14:00	Pausa comida
14:00 - 15:00	Del proyecto a la ejecución: ejemplos de proyectos de bioingeniería para la estabilización de laderas Association pour le Génie Végétal (AGéBio) - Klaus PEKLO Asociación Española de Ingeniería del Paisaje (AEIP) - Albert SOROLLA
15:00 - 15:30	Experiencias y perspectivas de una empresa local pirenaica especializada en el sector de la madera Explotaciones e Impregnaciones Forestales SA (EIFORSA) - Eduardo FERNÁNDEZ
15:30 - 17:30	Taller de maquetas miniaturas para la estabilización de laderas AEIB, EFIB y AGéBio - Paola SANGALLI, Guillermo TARDÍO, Klaus PEKLO, Albert SOROLLA
17:30 - 18:30	Puesta en común, aprendizajes y conclusiones finales EFIB et OPCC - Paola SANGALLI y Eva GARCÍA BALAGUER

Figure 6-6. Page 2 de l'agenda détaillé de l'événement de deux jours organisé en avril, 11th et 12th à Laruns (en espagnol).



SEMINARIO DE RESULTADOS

MIÉRCOLES 12 DE ABRIL 2023

- **Objetivo:** Presentar los resultados obtenidos en el proyecto PHUSICOS y debatir la eficacia de las soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos naturales en las zonas de montaña.
- **Público meta:** autoridades y técnicos de administraciones públicas forestales y de carreteras; pequeñas y medianas empresas de los sectores de la madera y la construcción; consultorías especializadas en riesgos naturales, geotécnica, etc.



<https://us06web.zoom.us/j/85988352654?pwd=NHBkV0RlV3VMZlZlZ0Z0QjBxbThibUlnZz09>

8:00 - 8:30 Bienvenida e inscripciones

8:30 - 9:00 Apertura institucional

- **Maire de la Commune de Laruns** - Robert CASADEBAIG
- **Commissaire de Massif des Pyrénées** - Delphine MERCADIER-MOURE (en línea)
- **Presidente del GECT Pirineos - Pyrénées** - José-Luis SORO (tbc)
- **Directrice du Parc National des Pyrénées** - Mélina ROTH
- **Représentant technique de la Région Nouvelle Aquitaine** - Matthieu BERGÉ (tbc)

9:00 - 10:00 Concepto de soluciones basadas en la naturaleza y su relevancia creciente en et Europa

- **Importancia de la biodiversidad en las soluciones basadas en la naturaleza (SbN)**
Pilar ANDRÉS PASTOR - CREAF, socio PHUSICOS
- **Bio-ingeniería en zonas de montaña**
Paola SANGALLI, Klaus PEKLO y Albert SOROLLA - AEIB, EFIB y AGéBio
- **Introducción al estudio de palancas y obstáculos de SbN y soluciones grises**
En nombre de IIASA, socio PHUSICOS

10:00 - 11:30 Experiencias y lecciones aprendidas del desarrollo de soluciones basadas en la naturaleza para la gestión de riesgos naturales en zonas montañosas: Capet, Artouste, Santa Elena y Erill la Vall

- **Relevancia de las ciencias y de la modelización de los riesgos**
Clara LÉVY - BRGM, socio PHUSICOS
- **Visualización del video del sitio de Artouste**
- **Mención a los 'Living Labs' PHUSICOS en los Pirineos**
Xavier CARBONNELL - ARC Mediación Ambiental
- **Mesa-redonda de expertos técnicos, dinamizada por Xavier CARBONELL**
Santiago FÁBREGAS REIGOSA - GECT Pirineos - Pyrénées
Alain BRUZY - Services RTM Pyrénées 64-65
Carles RAÏMAT - Geo-Hazard Advisor, KUROBA4
- **Visualización de los videos de los sitios de Capet, Santa Elena et Erill la Vall**

11:30 - 12:00 Pausa café






Figure 6-7. Page 3 de l'agenda détaillé de l'événement de deux jours organisé en avril, 11th et 12th à Laruns (en espagnol).

SEMINARIO DE RESULTADOS MIÉRCOLES 12 DE ABRIL 2023

- **Objetivo:** Presentar los resultados obtenidos en el proyecto PHUSICOS y debatir la eficacia de las soluciones basadas en la naturaleza para hacer frente a los riesgos naturales en las zonas de montaña.
- **Público meta:** autoridades y técnicos de administraciones públicas forestales y de carreteras; pequeñas y medianas empresas de los sectores de la madera y la construcción; consultorías especializadas en riesgos naturales, geotécnica, etc.

12:00 - 13:30 Las autoridades locales y la gestión integrada del territorio

- **Recorrido de PHUSICOS en los Pirineos y aprendizajes**
Éric LEROI - Experto en Gestión de Riesgos, socio PHUSICOS
- **Mesa-redonda con representantes electos del territorio, dinamizada por Éric LEROI**
Robert CASADEBAIG, Alcalde de Laruns
Pascal ARRIBET, Alcalde de Barèges
Jean-Louis NOGUÈRE, Alcalde de Sers
Sonia BRUGUERA, Alcalde de Vall de Boí
Representante de Comarca Alto Gallego (tbc)
Representante de Conseil Départemental 64 (tbc)

13:30 - 14:00 Conclusiones del seminario y perspectivas futuras

- **Representante técnico de la Région Nouvelle Aquitaine** - Matthieu BERGÉ (tbc)
- **Presidente de Federación Europea de Bioingeniería del Paisaje (EFIB)** - Paola SANGALLI
- **Director de la Comunidad de Trabajo de los Pirineos (CTP)** - Jean-Louis VALLS
- **Coordinadora del OPCC - CTP** - Eva GARCÍA BALAGUER

14:00 - 15:00 Pausa comida

15:00 - 17:00 Visita (opcional) del sitio de Artouste y de las soluciones de PHUSICOS (previa inscripción)



Figure 6-8. Page 4 de l'agenda détaillé de l'événement de deux jours organisé en avril, 11th et 12th à Laruns (en espagnol).

Annexe B

Liste des participants.

Figure 6-9 et Figure 6-10 détaillent les participants à l'événement.

	Nombre / Prénom	Apellidos / Nom	Empresa / Entreprise / Institución / Institution
1	Marc	Ancely	Arbisanat
2	Beatriz	Barinaga Mugica	Asmatu S.L.
3	Alejandro	Cantero	HAZI
4	Carles	Fañanás	Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural de la Generalitat de Catalunya
5	Carolina	García Suikkanen	Confederación Hidrográfica del Ebro
6	Lorenzo	Serrano Zuñeda	DG de Medio Natural y Gestión Forestal del Gobierno de Aragón
7	Olivier	Valfort	DDTM 64
8	Jean-Michel	Melh	Institut Patrimonial du Haut-Béarn (IPHB)
9	Clara	Lévy	BRGM
10	Joël	Coubluc	Mairie de Laruns - Adjoint au Maire
11	Jean-Marc	Moreno	Mairie de Laruns - Adjoint au Maire
12	Gérard	Lamagnère	Mairie de Laruns - Conseiller Municipal
13	Toni	Jobbe-Duval	Explotaciones e Impregnaciones Forestales SA (EIFORSA)
14	Robert	Casadebaig	Mairie de Laruns - Maire
15	Néida	García Sanz	DG de Cambio Climático y Educación Ambiental del Gobierno de Aragón
16	Anne	Busselot	Commissariat de Massif des Pyrénées
17	Josep Ma	Caba	SOLUTIONOMA
18	Eva	García Balaguer	Communauté de Travail des Pyrénées (CTP) - Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique (OPCC)
19	Didier	Vergès	Communauté de Travail des Pyrénées (CTP) - Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique (OPCC)
20	Eric	Leroi	R&D
21	Pilar	Andrés	CREAF
22	Paola	Sangalli	SCIA SL / EFIB
23	Sergio	Sangalli	SCIA SL
24	Klaus	Peklo	Klaus Peklo
25	Albert	Sorolla	Naturalea
26	Frédéric	Berger	INRAE

Figure 6-9. Détail des participants lors de la première journée de l'événement (journée de formation, 11/04/2023).

	Nombre / Prénom	Apellidos / Nom	Empresa / Entreprise / Institución / Institution
1	Marta	Pérez Banco	AECT Pirineos - Pyrénées
2	Santiago	Fábregas Reigosa	AECT Pirineos - Pyrénées
3	Alain	Bruzy	RTM ONF
4	Brice	Dupin	ECO-ALTITUDE
5	Clara	Lévy	BRGM
6	Marc	Ancely	Arbisanat
7	Nélida	García Sanz	DG de Cambio Climático y Educación Ambiental del Gobierno de Aragón
8	Olivier	Valfort	DDTM 64
9	Lorenzo	Serrano Zuñeda	DG de Medio Natural y Gestión Forestal del Gobierno de Aragón
10	Sylvie	Cassau	Mairie de Laruns - Adjointe au Maire
11	Eric	Leroi	R&D
12	Célia	Amorich	ONF
13	Sònia	Bruguera	Vall de Boí
14	Carles	Raïmat	Kuroba4
15	Jona	Trujillo	Kuroba4
16	Christian	Paille-Barrere	Conseil Départemental 64
17	Jean-Louis	Noguère	Mairie de Sers - Maire
18	Albert	Sorolla	Naturelea
19	Pascal	Arribet	Mairie de Barèges - Maire
20	Ricard	Baró	Fent Cami
21	Carles	Fañanás	Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural de la Generalitat de Catalunya
22	Alejandro	Cantero	HAZI
23	Klaus	Peklo	Klaus Peklo
24	Carolina	García Suikkanen	Confederación Hidrográfica del Ebro
25	Étienne	Czernecka	Sud Ouest - Journaliste
26	Eva	García Balaguer	Communauté de Travail des Pyrénées (CTP) - Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique (OPCC)
27	Didier	Vergès	Communauté de Travail des Pyrénées (CTP) - Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique (OPCC)
28	Xavier	Carbonell	ARC Mediación Ambiental
29	Mélina	Roth	Parc National des Pyrénées
30	Delphine	Mercadier	Commissariat de Massif des Pyrénées
31	Jean-Louis	Valls	Communauté de Travail des Pyrénées (CTP)
32	Frédéric	Berger	INRAE

Figure 6-10. Détail des participants au cours de la deuxième journée de l'événement (journée de séminaire sur les résultats, 12/04/2023).



Projet H2020 PHUSICOS
Convention de subvention n° 776681