

**UNIVERSITÉ PARIS-SORBONNE (PARIS 1)
UNIVERSITÉ PARIS-EST CRÉTEIL (PARIS 12)**

UNIVERSITÉ PARIS-DIDEROT (PARIS 7)

**UFR G.H.E.S
Géographie, Histoire, Economie et Sociétés**

**Master 2 Géographie et Sciences des Territoires
Spécialité : Dynamique des milieux et risques (DYNARISK)**

**LAVES TORRENTIELLES RÉCENTES À
CHOSICA (LIMA-PÉROU) : L'IMPACT DES
BARRIÈRES FLEXIBLES**



Barrière flexible # 3 dans le torrent Pedregal
SOURCE : Autorité National de l'Eau du Pérou (ANA), 2018

M. Alexis Ricardo MEJIA UQUICHE

**Sous la direction de Mme Josyane RONCHAIL
(Maître de conférences à l'Université Paris-Diderot)**

Soutenu le 04 juin 2018

REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire. D'abord, ma directrice de mémoire, Josyane Ronchail (Maitre de conférences à l'université Paris 7), qui m'a accompagné au cours de ce travail, avec ses recommandations sur le fond et la forme du rapport.

De plus, en février et mars 2018, quand j'ai fait le travail sur le terrain, j'ai pu être en contact et obtenir des informations de plusieurs entités péruviennes, et, pour cela je remercie aussi leurs représentants : M. Waldo Lavado, chercheur du Service National de Météorologie et d'Hydrologie du Pérou, qui grâce à l'intercession de ma directrice de mémoire, m'a fourni des données météorologiques et hydrologiques de son entité, et surtout Mme. Sofia Endara, chercheur qui m'a aidé dans le traitement de ces données ; M. Felix Caubi, ingénieur de l'Autorité nationale de l'eau du Pérou (ANA), qui m'a fourni des données sur les travaux de nettoyage des Barrières Dynamiques, et surtout à l'ingénieur M. Moisés Narvaez, qui m'a expliqué le fonctionnement de ces structures *in-situ* ; M. José Martinez, chef du Centre d'Opérations de Secours de Lurigancho-Chosica (COE-CHOSICA) ; M. Juan Gomez, directeur de la sous-direction de Sciences de la Terre Solide de l'Institut de Géophysique du Pérou (IGP) ; et des habitants des quartiers dans les torrents Pedregal, Quirio, Carossio et Corrales, qui gentiment m'ont apporté leurs témoignages sur les laves torrentielles.

Je voudrais enfin remercier Marie Chenet (Maitre de conférences à l'université Paris 1) et Aline Garnier (Maitre de conférences à l'université Paris 12) pour leur participation au jury de mémoire.

À chacun d'eux, qui partage avec moi le désir que le Pérou avance en matière de gestion du risque de catastrophe, mes plus sincères remerciements.

LAVES TORRENTIELLES RÉCENTES À CHOSICA (LIMA - PÉROU) : L'IMPACT DES BARRIÈRES FLEXIBLES

RÉSUMÉ

Chosica, capitale du district de Lurigancho-Chosica (ville de Lima - Pérou), est fréquemment frappée par des laves torrentielles à cause de ses caractéristiques physiques : la ville est en effet située dans une région montagneuse aux pentes fortes recouvertes par des dépôts quaternaires instables, et elle est traversée par des torrents qui se jettent dans la rivière Rímac au cœur de la ville. Ces événements ont produit de nombreuses pertes humaines et économiques, en particulier ceux de 1987 (les plus catastrophiques) et ceux de 2012 et 2015. Cependant, les laves torrentielles de 2017 ont produit moins de pertes que celles des années précédentes. Ceci est attribué principalement à la mise en place en 2016 de 21 « barrières flexibles » en amont des 8 torrents de la ville de Chosica par l'Autorité Nationale de l'Eau du Pérou (ANA). Ces structures, qui sont des filets métalliques, ont retenu d'importantes quantités de matériel sédimentaire des torrents, évitant leur chute vers les zones en aval où se localise la population. Ces filets ont diminué les intensités des écoulements torrentiels en 2017, alors même que la quantité de pluie a été plus élevée cette année-là que lors des événements précédents (2012 et 2015), à cause du phénomène *El Niño Costero*. De plus, la quantité de matériel retenu par les filets a varié selon les torrents, à cause de leurs caractéristiques géomorphologiques, principalement la taille des bassins versants torrentiels et leurs pentes. L'intensité des laves torrentielles a varié aussi selon l'apport de matériel sédimentaire par des affluents des torrents et par l'érosion de leurs lits. Ce nouveau matériel s'est formé en aval de la barrière la plus proche de la zone où se localise la population lors de deux épisodes en 2017, de telle sorte que les intensités de ces deux laves torrentielles ont été très fortes. Cependant, lors des 39 autres écoulements torrentiels de 2017, les intensités ont été bien moindres grâce au fait que de grandes quantités de sédiments ont été retenues par les barrières flexibles et ne sont pas arrivées en aval ; cela montre que de manière générale, l'impact de cette mesure structurelle face aux laves torrentielles a été très positif.

Mots clés : Chosica, lave torrentielle, intensité d'écoulement torrentiel, précipitations, *El Niño*, barrière flexible, matériel retenu, géomorphologie

HUAICOS RECIENTES EN CHOSICA (LIMA - PERU): EL IMPACTO DE LAS BARRERAS DINÁMICAS

RESUMEN

Chosica, capital del distrito de Lurigancho-Chosica (ciudad de Lima - Perú), es afectado frecuentemente por los huaicos a causa de sus características físicas: la ciudad está situada en una región montañosa con pendientes fuertes, cubierta por depósitos cuaternarios inestables, con quebradas que desembocan en el río Rímac quien atraviesa la ciudad. Estos eventos han producido muchas pérdidas de vidas humanas y económicas, en particular aquellos de los años 1987 (los más catastróficos), 2012 y 2015. Sin embargo, los huaicos del 2017 han producido menos pérdidas que aquellas de los años precedentes. Esto se atribuye principalmente a la instalación en el 2016 de 21 “barreras dinámicas” por parte de la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Estas estructuras, que son mallas metálicas, retuvieron grandes cantidades de material sedimentario de las quebradas, evitando que lleguen a las zonas bajas donde se localiza la población. Estas mallas han disminuido las intensidades de los flujos torrenciales en el 2017, aún ante una cantidad de lluvia que fue mucho más elevada que de los años precedentes (2012 y 2015), a causa del fenómeno *El Niño Costero*. Asimismo, la cantidad de material retenido por las mallas ha sido variable a nivel de quebrada, debido a sus características geomorfológicas, principalmente al tamaño de las cuencas de las quebradas y a sus pendientes. La intensidad de los huaicos varía también según el aporte de material sedimentario por parte de los afluentes de las quebradas y por la erosión de sus cauces. Este nuevo material se formó aguas abajo de la barrera más próxima a donde se localiza la población en dos episodios en el 2017, de tal forma que las intensidades de estos dos huaicos fueron altas. Sin embargo, en los otros 39 flujos torrenciales del 2017, las intensidades fueron mucho menores gracias a que grandes cantidades de sedimentos fueron retenidos por las barreras dinámicas no llegando a las partes bajas; esto muestra que de manera general, el impacto de esta medida estructural frente a los huaicos ha sido muy positivo.

Palabras claves: Chosica, huaico, intensidad de flujos torrenciales, precipitaciones, *El Niño*, barrera dinámica, material retenido, geomorfología

RECENT DEBRIS FLOWS IN CHOSICA (LIMA – PERU): IMPACT OF THE RING NET BARRIERS

ABSTRACT

Chosica, capital of Lurigancho-Chosica district (Lima city – Peru), is affected frequently by debris flows because of its physical characteristics: indeed, the city is located in a mountainous region with steep slopes, covered by unstable quaternary deposits, with torrents flowing into Rímac River, who passes across the city. These events are responsible for human losses and economic damages, in particular, those of 1987 (the most catastrophic), 2012 and 2015. However, the debris flows of 2017 have caused fewer losses than those of the previous years. This is attributed mostly to the installation in 2016 of 21 “ring net barriers” by the National Water Authority of Peru (ANA). These structures, which are wire meshes, retained big quantities of sedimentary material of the torrents, avoiding their arrival to downstream areas where the population is located. These meshes diminished the intensities of the torrential flows in the low-lying areas in 2017, even in the face of a quantity of rain that was much higher than of the previous years (2012 and 2015), because of *El Niño Costero* phenomenon. Further, the quantity of material retained by the meshes has been variable according to the torrent, due to their geomorphologic characteristics, mainly to the size of the torrent and to their slopes. Other characteristics that have intervened in the variation of the debris flow intensity have been the contribution of sedimentary material on the part of the torrent tributaries and the erosion of the riverbed. This new material was formed downstream from the barrier the nearest to where the population is located in two episodes in 2017, in such a way that the intensity of these two debris flows were high. Nevertheless, in the other 39 torrential flows of 2017, their intensities were very much minor thanks to the fact that big quantities of sediments were retained by the ring net barriers and did not come to the downstream areas; this shows that in a general way, the impact of this structural measure against the debris flows has been positive.

Keywords: Chosica, debris flow, intensity of torrential flows, rainfall, *El Niño*, ring net barrier, material retained, geomorphology

SOMMAIRE

INTRODUCTION	9
CHAPITRE I : EXPÉRIENCES DES DERNIERS ÉPISODES DE LAVES TORRENTIELLES DANS LA VILLE DE CHOSICA	12
CHAPITRE II : LES PRÉCIPITATIONS ET L'INTENSITE DES LAVES TORRENTIELLES À CHOSICA, UNE RELATION DIRECTE ?	36
CHAPITRE III : IMPACT DES BARRIÈRES FLEXIBLES SUR LA RÉDUCTION DE L'INTENSITÉ DES LAVES TORRENTIELLES À CHOSICA	62
CONCLUSION	93
ANNEXES	103

TABLE DES ABRÉVIATIONS

1. AMS : *American Meteorological Society* (traduit par « Société Météorologique Américaine »)
2. ANA : *Autoridad Nacional del Agua* (« Autorité Nationale de l'Eau du Pérou », en espagnol)
3. CCD : *Cold Cloud Duration* (traduit par « durée de persistance des nuages froids »)
4. CHIRPS : *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data* (traduit par « Précipitation Infrarouge du Groupe des Aléas Climatiques avec des Données de Stations »)
5. COE - CHOSICA : *Centro de Operaciones de Emergencia del distrito de Lurigancho-Chosica* (« Centre d'Opérations de Secours du district de Lurigancho-Chosica », en espagnol)
6. COEN-INDECI : *Centro de Operaciones de Emergencia Nacional del Instituto Nacional de Defensa Civil* (« Centre d'Opérations de Secours National du Pérou de l'Institut National de Défense Civile du Pérou », en espagnol)
7. DIPECHO : *Disaster Preparedness ECHO programme* (traduit par « Programme de préparation aux catastrophes d'ECHO »)
8. ECHO : *The European Commission's Humanitarian Aid and Civil Protection department* (traduit par « Commission européenne à l'aide humanitaire et à la protection civile »)
9. ENFEN : *Estudio Nacional del Fenómeno El Niño* (« Étude Nationale du Phénomène *El Niño* au Pérou », en espagnol)
10. ENSO : *El Niño - Southern Oscillation* (traduit par « El Niño et l'Oscillation Australe »)
11. ESRL – NOAA : *Earth System Research Laboratory of the National Oceanic and Atmospheric Administration* (traduit par « Laboratoire de recherche sur le système terrestre de l'Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique »)
12. IGP : *Instituto Geofísico del Perú* (« Institut de Géophysique du Pérou », en espagnol)
13. INDECI : *Instituto Nacional de Defensa Civil* (« Institut National de Défense Civile du Pérou », en espagnol)
14. INEI : *Instituto Nacional de Estadística e Informática* (« Institut National de Statistique et d'Informatique du Pérou », en espagnol)

15. INGEMMET : *Instituto Geológico Minero y Metalúrgico* (« Institut Géologique, Minier et Métallurgique du Pérou », en espagnol)
16. IOA : Indice d'Oscillation Australe
17. KOICA : *Korea International Cooperation Agency* (traduit par « Agence Coréenne de Coopération Internationale »)
18. MINAGRI : *Ministerio de Agricultura* (« Ministère de l'Agriculture du Pérou », en espagnol)
19. NOAA : *National Oceanic and Atmospheric Administration* (traduit par « Agence Américaine d'Observation Océanique et Atmosphérique »)
20. ONG : Organisation non gouvernementale
21. ORL : *Outgoing Longwave Radiation* (traduit par « rayonnement sortant de grande longueur d'onde »)
22. PIB : Produit intérieur brut
23. PISCO : *Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations* (traduit par « Données interpolées du Pérou des stations climatologiques et hydrologiques du SENAMHI »)
24. PREDES : Centre d'études et de prévention de catastrophes
25. SAP : Système d'alerte précoce
26. SBVD : Sous-bassins versant défini
27. SENAMHI : *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú* (« Service National de Météorologie et d'Hydrologie du Pérou », en espagnol)
28. SINPAD-INDECI : *Sistema de Información Nacional para la Respuesta y Rehabilitación del Instituto Nacional de Defensa Civil* (« Système d'Information Nationale pour la Réponse et la Réhabilitation de l'Institut National de Défense Civile du Pérou », en espagnol)
29. TSO : Température de surface océanique
30. UNMSM : *Universidad Nacional Mayor de San Marcos* (« Université Nationale de San Marcos au Pérou », en espagnol)
31. USGS : *United States Geological Survey* (traduit par « Institut d'Études Géologiques des États-Unis »)
32. UTC : *Coordinated Universal Time* (traduit par « temps universel coordonné »)
33. WSL : *Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft* (« Institut fédéral suisse de recherches sur la forêt, la neige et le paysage », en allemand)
34. ZCIT : Zone de Convergence Inter-Tropicale

INTRODUCTION

Une des régions péruviennes où des laves torrentielles produisent des dégâts considérables est la ville de Chosica, qui est la capitale du district de Lurigancho-Chosica, dans la banlieue de Lima. Ces phénomènes se produisent environ tous les 2 à 5 ans (mairie de Lurigancho-Chosica, 2016). L'épisode de 1987 a été le plus catastrophique (100 décès et 1052 logements détruits ; Abad, 2009), et a été le point de départ de la mise en place de mesures structurelles et non-structurelles dans le district pour réduire le risque (Abad, 2009).

Dans une étude précédente (mémoire de M1)¹, nous avons fait l'analyse globale de l'évolution du risque dans le district de Lurigancho-Chosica entre 1987 et 2017, qui comprenait l'étude de l'aléa, de la vulnérabilité et du degré d'exposition des populations, ainsi que des mesures de gestion du risque. Un des sujets qui a attiré mon attention lors de cette recherche de M1 a été l'ajout d'une nouvelle mesure structurelle à Chosica réalisée par l'Autorité Nationale de l'Eau du Pérou (ANA) en 2016 : l'installation des *Barreras Dinámicas* (ici, « barrières flexibles »²). 21 structures de ce type (des filets métalliques) ont été installées dans la partie supérieure des bassins versants torrentiels sur 8 torrents de la ville de Chosica (Pedregal, Mariscal Castilla, Corrales, Carossio, La Libertad, Quirio, Santo Domingo et La Ronda) cette année-là, de telle sorte que, lors des laves torrentielles de 2017, d'importantes quantités de matériel sédimentaire ont été retenues en amont des torrents, évitant leur chute vers les zones en aval où se localise la population. Donc, mon envie de mieux connaître l'impact de ces barrières flexibles et le désir de comprendre avec plus de clarté leur fonctionnement et leur conception (puisque j'ai une formation de base d'ingénieur civil) ont été mes motivations principales pour aller plus loin et étudier en profondeur ce sujet.

L'objectif de cette mesure étant la rétention de matériel sédimentaire de grandes dimensions à l'amont des torrents, les flux des laves torrentielles qui arrivent à l'aval sont composés principalement d'eau et de boue, ce qui fait que ces flux sont moins intenses

¹ Mon mémoire de première année du master « Géographie et Sciences de Territoires » à l'université Paris Diderot (Paris 7) appelé « Laves torrentielles à Lurigancho-Chosica (Lima – Pérou) : L'évolution du risque et des mesures de gestion ».

² *Barreras Dinámicas* (« Barrières Dynamiques », en espagnol) est le nom utilisé dans le cadre du projet qui a concerné l'installation de ces structures à Chosica en 2016, mais son nom technique en français est « Barrières Flexibles » (Geobruigg, 2018b).

(quand on considère leur composition) dans les zones peuplées. Ainsi, l'apport des barrières flexibles est de réduire l'intensité des laves torrentielles. Cependant, cette variation de l'intensité peut être liée aussi à la quantité de précipitations et aux conditions géomorphologiques des torrents, car ces deux facteurs interviennent dans le déclenchement des laves torrentielles.

Compte tenu de ces idées, nous avons formulé la problématique de cette recherche de la façon suivante :

Est-ce que la mise en place des barrières flexibles en 2016 à Chosica a fait varier l'intensité des laves torrentielles qui s'écoulent à l'aval des torrents ? Est-ce que cette variation d'intensité des laves torrentielles est aussi due à la variabilité interannuelle des précipitations ? Jusqu'à quel point les caractéristiques géomorphologiques de chaque torrent sont liées à l'intensité des laves torrentielles ?

Afin d'obtenir des réponses appropriées à ces problématiques, nous avons créé un indicateur qui permet de classer l'intensité des laves torrentielles, fondé sur la composition du flux qui s'écoule dans les zones en aval où se localise la population. Donc, avec cet indicateur nous pouvons observer la variation de l'intensité des laves torrentielles avant et après la mise en place des barrières flexibles (avant et après 2016) afin d'analyser leur impact, et analyser cette variation en fonction des précipitations et des conditions géomorphologiques. Sur la base des enregistrements de laves torrentielles des années 2012, 2015 et 2017, de l'information relative aux précipitations journalières, de la quantité de matériel retenue par barrière et de l'information géomorphologique sur les torrents, nous présentons les hypothèses suivantes :

1. L'intensité des laves torrentielles de la ville de Chosica en 2017 a été moins importante qu'en 2012 et 2015.
2. Il y a une relation directe entre la quantité de précipitation et l'intensité des laves torrentielles des années 2012, 2015 et 2017 enregistrées dans la ville de Chosica.
3. Le matériel retenu par les barrières flexibles en 2017, qui est un indicateur de la susceptibilité d'un torrent à produire des laves torrentielles plus ou moins intenses, est proportionnel à la taille des bassins versants torrentiels de la ville de Chosica.
4. Les barrières en aval ont retenu moins de matériel que les barrières en amont pour chaque torrent de la ville de Chosica lors des laves torrentielles de 2017, ce qui

montre que l'intensité des flux s'amenuise au fur et à mesure qu'il avance au travers des barrières.

Ce document entend valider ou infirmer ces hypothèses, avec l'objectif de répondre à la problématique, en considérant l'information disponible : travaux de recherche, thèses, information géographique, informations spécialisées de diverses entités, sorties de terrain et entretiens avec les autorités et les leaders du quartier. Cependant, il faut souligner qu'il y a eu des limitations par rapport aux informations. C'est le cas par exemple pour l'identification de l'intensité des flux des laves torrentielles. En effet, les intensités (basées sur la composition des flux) ont été décrites principalement au moyen de témoignages, qui peuvent être altérés selon la perception de chaque personne. De plus, dans le cas des pluies, les données peuvent être différentes de la réalité, car des pluies très localisées peuvent apparaître dans certaines zones, hors de l'endroit où se trouve l'instrument de mesure censé l'enregistrer.

En prenant en compte ces considérations et à la recherche de réponses aux hypothèses et à la problématique, nous avons considéré que ce document devait compter trois chapitres : le premier, qui permet de répondre à la première hypothèse, présente la description de la zone d'étude (localisation et situation physique et socio-économique de la ville de Chosica), les conséquences des laves torrentielles de 2012, 2015 et 2017, et la classification des écoulements torrentiels de ces années selon l'intensité des flux ; dans le deuxième chapitre, nous avons fait une description des précipitations dans la ville de Chosica (y compris de la relation entre leur quantité et l'occurrence du phénomène *El Niño*), la comparaison entre les différents enregistrements concernant notre zone d'étude, et la relation entre précipitation et intensité des laves torrentielles, répondant ainsi à la deuxième hypothèse ; et dans le troisième chapitre, nous avons décrit le fonctionnement des barrières flexibles à Chosica, et la quantité de matériel retenu par chacune d'entre elles nous a aidé à compléter notre compréhension du comportement géomorphologique des 8 torrents étudiés, ainsi que l'impact des barrières sur l'intensité des laves torrentielles, toutes choses qui permettent de répondre aux deux dernières hypothèses. À la fin, nous présentons la section de « conclusion », qui, avec des informations liées à chaque hypothèse, permet de répondre à la problématique selon les appréciations de l'auteur de ce document.

CHAPITRE I

EXPÉRIENCES DES DERNIERS ÉPISODES DE LAVES TORRENTIELLES DANS LA VILLE DE CHOSICA

1.1. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Notre zone d'étude (la ville de Chosica) est la capitale du district de Lurigancho-Chosica, dans la province de Lima, dans la région qui porte le même nom (« Région Lima ») au Pérou (INEI, 2008) (figure 1). Elle se trouve à l'est du district, dont les coordonnées géographiques sont : 11°56'00" Latitude Sud (11.933°S) et 76°42'04" Longitude Ouest (76.701°W), avec une altitude moyenne de 861 m (Mairie de Lurigancho-Chosica, 2013).

Selon les limites territoriales, le district possède une superficie de 236,46 km² (Mairie de Lurigancho-Chosica, 2013), cependant, la surface où se localise la population est seulement de 78,14 km² environ. La raison en est qu'une grande partie du territoire est montagneuse (avec des altitudes pouvant atteindre 2200 m vers le sud-est), donc les parties centrales et supérieures des montagnes ne sont pas habitables à cause des fortes pentes de 60° et 70° (GOOGLE EARTH, 2018) et la population est installée sur leurs parties inférieures. C'est ainsi que la relation entre la superficie totale et la zone urbanisée est de 3 contre 1, alors que dans le cas de la ville de Chosica, dont les limites se trouvent en tête de bassins, la relation est environ de 7 à 1 (limites territoriales : 52,61 km² ; zone urbanisée : 7,56 km²). Cette différence entre district et ville est due au fait que la surface où se localise la ville inclut les deux rives de la rivière Rimac qui traverse le district (qui est parallèle aussi à l'Autoroute Centrale), alors que l'autre partie du district comprend seulement la rive droite (figure 1).

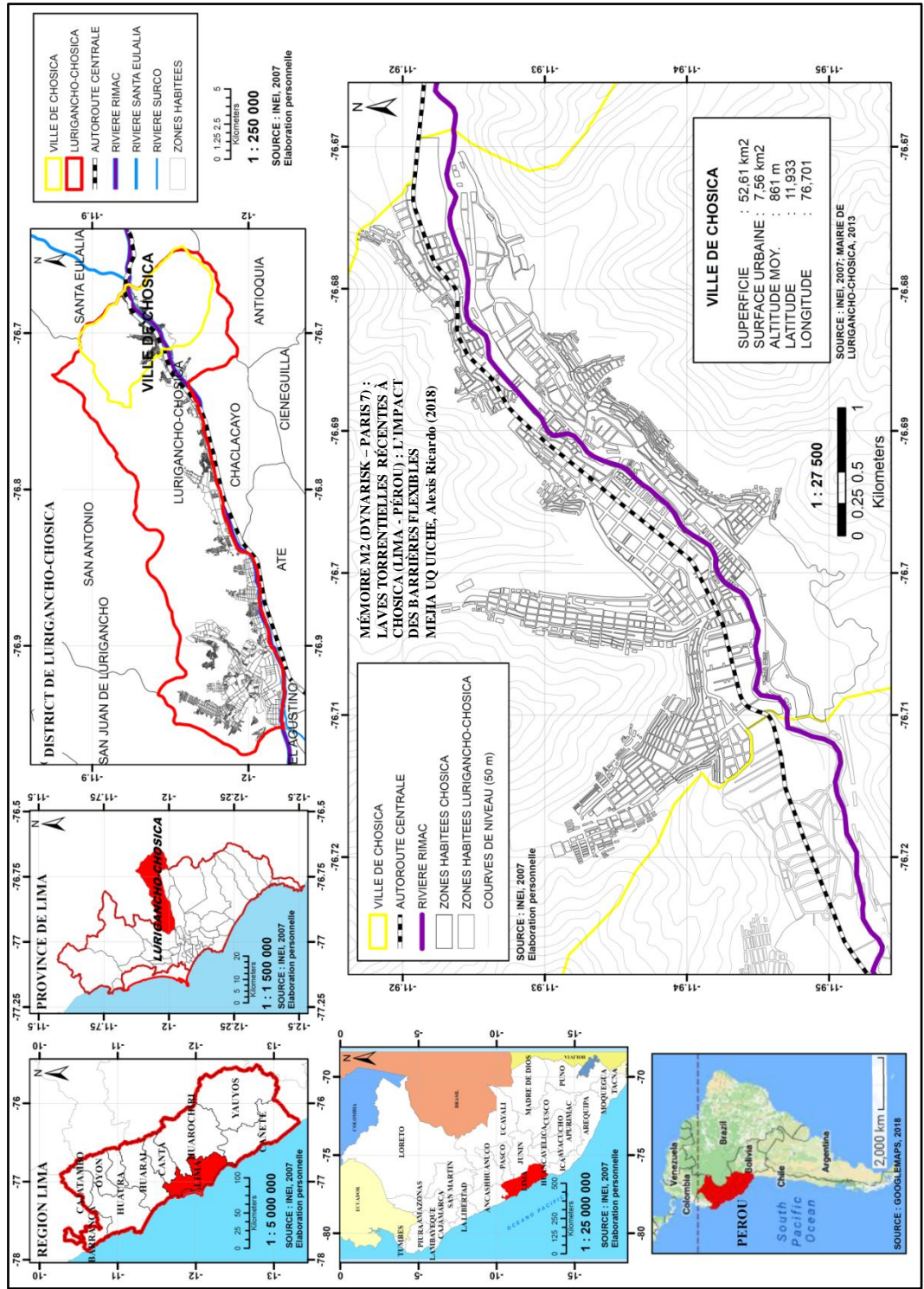


Figure 1. Localisation de la ville de Chosica

SOURCE : Google Maps 2018 ; Marie de Lurigancho-Chosica, 2013 ; INEI, 2007
 Elaboration personnelle

Le relief de la ville de Chosica est dû à sa localisation sur les flancs de montagne de la Cordillère Occidentale des Andes, qui s'étend comme une bande étroite tout au long de l'Amérique du Sud, et atteint les 6000 m environ dans le centre du pays (Palacios *et al.*, 1992). Du point de vue géologique, cette zone d'étude est formée par une série de roches plutoniques comme des diorites et des granites (Ibid), qui sont facilement érodables par l'action de l'eau et du vent (ANA, 2010). Sont également notables des dépôts quaternaires qui comprennent des dépôts alluviaux (des matériaux facilement mobilisables) et des colluvions (matériaux instables et facilement affectés par le ruissellement et l'activité bio-anthropique), sous forme de blocs de grandes dimensions et de cailloux, mais aussi des sables, des limons et des argiles (Ibid).

Du point de vue hydrographique, la ville de Chosica est située dans le bassin versant de la rivière Rimac qui se forme dans la Cordillère Centrale des Andes (4700 m d'altitude) et se jette dans l'Océan Pacifique après un parcours de 127 km. La superficie de ce bassin versant est de 3504 km² couvrant une grande partie de la région de Lima (les provinces Lima, Huarochirí et Yauli) et dans une moindre mesure la région de Junín. La zone d'étude se localise dans le sous-bassin versant Jicamarca – Santa Eulalia, alors que le district du Lurigancho-Chosica comprend celui-ci, mais aussi le sous-bassin versant Jicamarca (ANA, 2010) (figure 2).

Dans ce bassin versant, les pluies sont en moyenne de 515 mm/an (1969-2004) (Lavado *et al.*, 2012) ; cependant, presque la totalité de cette quantité tombe sur la partie amont du bassin versant, ce qui est cohérent avec le fait qu'en aval, au niveau de la mer (autour de la ville de Lima), les précipitations sont presque nulles, et autour de la zone d'étude, elles peuvent atteindre seulement 50 mm/an. Ceci explique la présence d'une végétation faible composée de xérophiles et de graminées (Ibid).

La côte du Pérou (qui comprend la province de Lima où se trouve Chosica) se localise dans la zone tropicale ; elle devrait donc présenter des précipitations fortes et une végétation abondante. Cependant, comme indiqué ci-dessus, c'est une zone presque désertique sur la frange côtière. Cette situation est causée principalement par le couplage océan-atmosphère sur les côtes Pacifique d'Amérique du Sud. En effet, le courant de Humboldt (courant marin froid qui vient du Sud et se déplace parallèlement à la côte jusqu'au nord du Pérou), ainsi que la remontée d'eaux froides de profondeur, l'*upwelling*, renforcent l'anticyclone

subtropical du Pacifique sud, ce qui stabilise l'atmosphère et empêche les précipitations sur la région côtière (Tumialán, 2015). En plus, ils confèrent une température moyenne relativement basse pour cette latitude : 16,1°C en août et 22,8°C en février (données mesurées entre 1910 et 1990 à Lima ; WorldClimate, 2018). La saison des pluies liée à l'advection d'eaux chaudes provenant du nord, le long de la côte a lieu en été austral (ANA, 2010) ; c'est aussi le moment où il pleut dans les Andes tropicales.

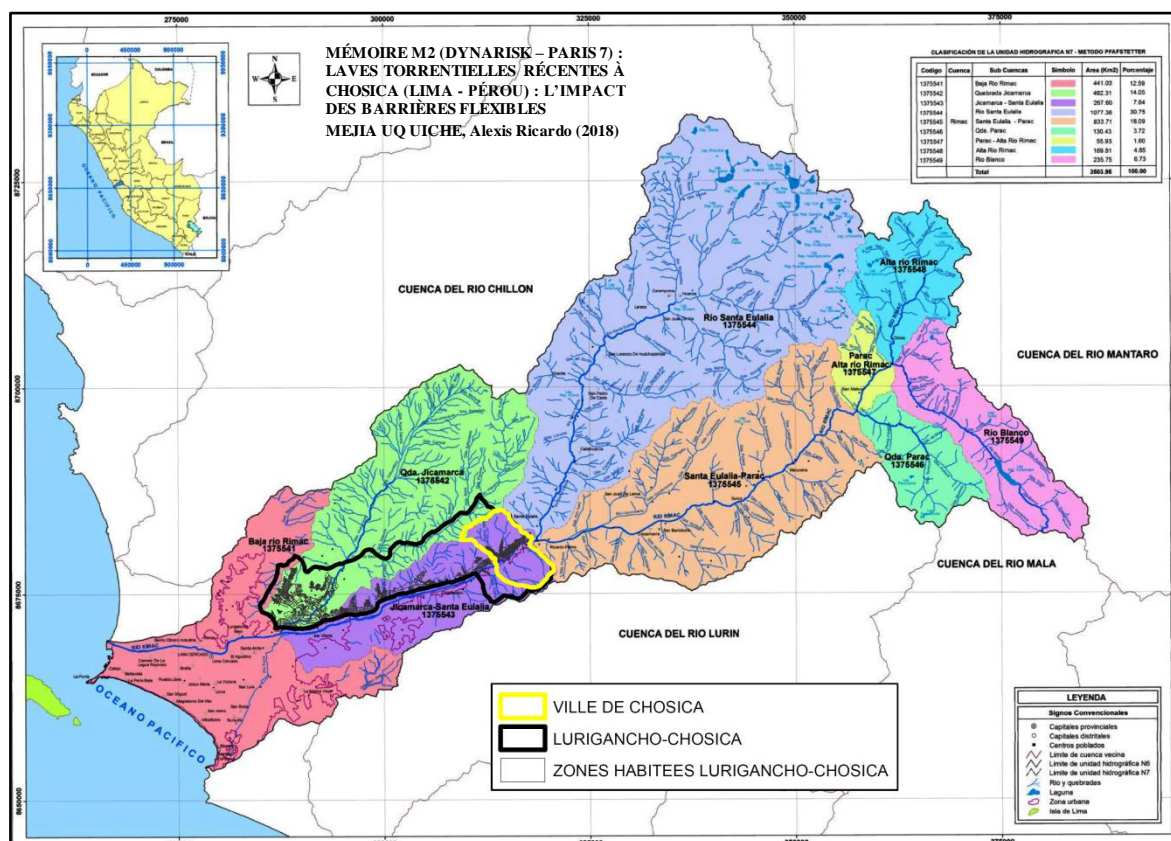


Figure 2. Bassin versant et sous-bassins versants de la rivière Rímac – Ville de Chosica

SOURCE : Sur la base de données de l'ANA, 2010 et de l'INEI, 2007

En conséquence, la rivière Rímac dont le débit moyen est de 31 m³/s a un régime saisonnier caractérisé par une époque d'étiage de juin à novembre alors que pendant les autres mois (principalement entre décembre et mars) le débit augmente de manière remarquable : il passe ainsi d'un minimum de 17 m³/s (en août) à un maximum de 70 m³/s (en mars) de (enregistrements à la station Chosica entre 1969 et 2004) (Lavado *et al.*, 2012). Les variabilités saisonnières mensuelles (de septembre à août, période 1969-2004) des précipitations et des débits du bassin versant de la rivière Rímac à Chosica sont

représentées en pourcentage des valeurs annuelles dans la figure 3 ; elles montrent effectivement l'époque d'étiage qui est liée aux mois où sont enregistrées des faibles précipitations (juin-novembre), et les pics les plus importants qui se produisent en février-mars, avec un léger décalage des débits (maximum en mars) par rapport aux pluies.

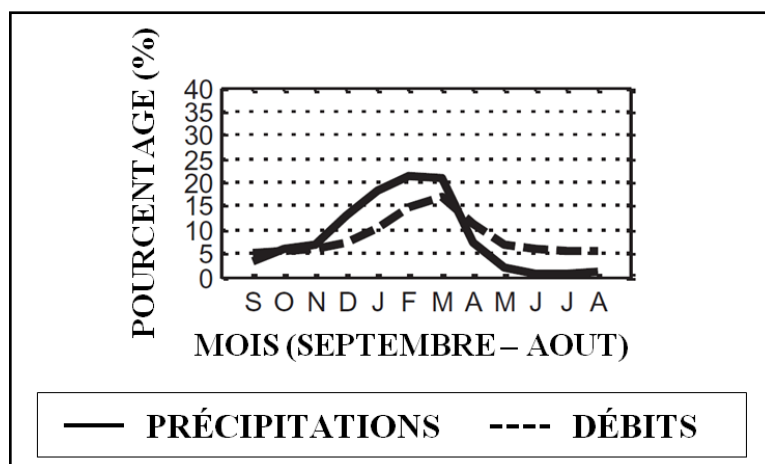


Figure 3. Précipitations et débits mensuels (septembre-août) entre 1969 et 2004 du bassin versant de la rivière Rímac (exprimés en pourcentage des valeurs annuelles)

SOURCE : Lavado *et al.*, 2012

La rivière Rímac traverse Chosica ainsi que ses affluents qui sont des torrents. Entre janvier et mars (la période de précipitation et de débits de la rivière Rímac les plus forts de l'année), ces torrents, habituellement à sec, peuvent fonctionner et produire des laves torrentielles. Les torrents qui sont plus susceptibles de générer ces phénomènes sont : Quirio (Nicolás de Piérola), Santo Domingo, Pedregal (San Antonio), La Libertad, Mariscal Castilla, Carossio, Corrales (Rayos de Sol) et La Ronda (Mairie de Luriganchochosica, 2013) ; ce sont ceux qui seront pris en compte dans le cadre de notre zone d'étude (figure 4).

Le problème des déclenchements de ces torrents est qu'ils produisent des grandes pertes socio-économiques, en endommageant « l'Autoroute Centrale du Pérou » (qui traverse la ville de Chosica parallèlement à la rivière Rimac) et en portant préjudice à la population qui habite dans les parties centrales et basses des mêmes torrents.

Cette autoroute est une des plus importantes du pays (conjointement avec « l'Autoroute Panamericana » qui traverse toute l'Amérique du nord au sud), car elle connecte Lima et les régions de la Sierra du Pérou. Sa fermeture à cause des laves torrentielles empêche le

transport des produits, comme les minerais, les produits agricoles et d'élevage pour nourrir principalement la population de Lima (environ 10 millions d'habitants), et le transport des passagers qui augmente chaque année (79 millions en 2014 avec un accroissement annuel de 3,5 %) (Alarcón, 2016). Même s'il y a 5 routes alternatives pour faire cette connexion, quelques-unes n'ont pas la capacité suffisante pour permettre le transport des camions articulés à plus de trois essieux (Ibid), raison pour laquelle le blocage de l'Autoroute Centrale dans la zone d'étude produit des grandes pertes économiques à l'échelle nationale.

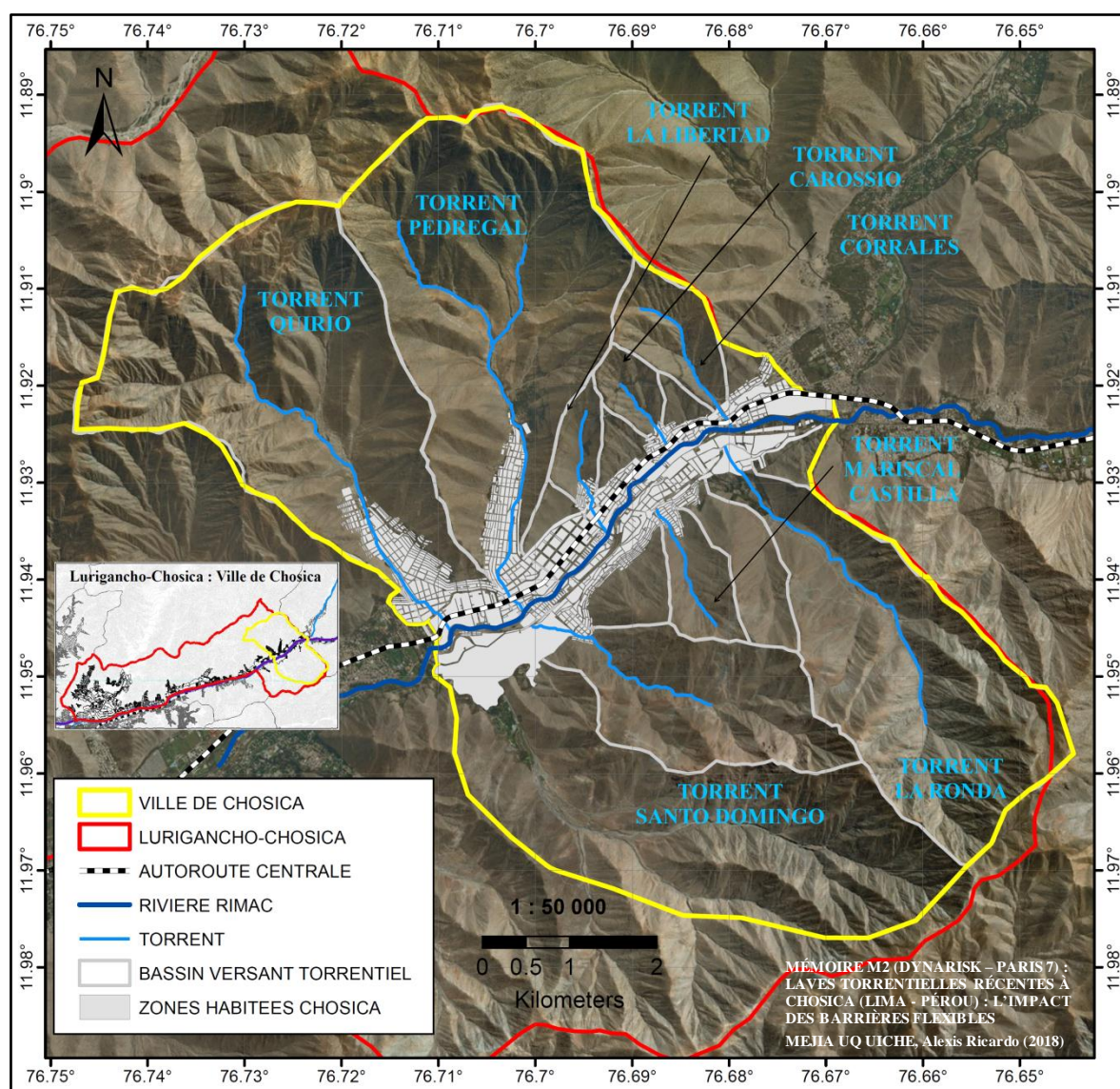


Figure 4. Carte hydrographique de la ville de Chosica

SOURCE : DigitalGlobe, 2016 ; Mairie de Lurigancho-Chosica, 2013 ; INEI, 2007
Elaboration personnelle

C'est précisément l'Autoroute Centrale qui a favorisé un fort développement économique dans cette zone, et, conséquemment, sa croissance démographique.

Selon le recensement officiel du Pérou réalisé en 2007 (XI^{ème} recensement de la Population et VI^{ème} du Logement), la population du district de Lurigancho-Chosica était de 169359 habitants (taux d'accroissement de 3,7 %) (INEI, 2007), avec une population projetée pour l'année 2015 de 218976 habitants (INEI, 2009a). Donc, la population actuelle du district (pour le premier trimestre 2018) pourrait atteindre les 220000 habitants. Dans le cas de la ville de Chosica, selon la délimitation territoriale établie dans la figure 1 et compte tenu de la base de données de l'Institut national de statistique et d'informatique du Pérou (INEI 2007), la population de la zone d'étude était de 58781 habitants en 2007. Compte tenu du taux d'accroissement du district (3,7 %), nous pouvons calculer la population à la fin de 2017 (population future) en utilisant la formule suivante :

$$P_f = P_0 (1+r)^t ; \text{INEI, 2009b}$$

Où : P_f = Population future ; P_0 = Population initiale ; r = taux d'accroissement ; t = temps en années (différence entre la date de la population finale et celle de la population initiale).

En appliquant cette formule à la population enregistrée en 2007, la population estimée à la fin de 2017 serait de 84533 personnes, c'est-à-dire que la population actuelle (pour le premier trimestre 2018) de la zone d'étude serait de 85000 personnes environ.

Malheureusement, la croissance démographique a été désordonnée, de telle sorte qu'à l'échelle de la ville de Chosica, en tenant compte de la population de 2007 et du relief de la ville, la population qui se localise sur les pentes des collines, là où se trouvent les torrents, pourrait de 21000 personnes environ, presque 36 % de la population totale (figure 5).

De plus, selon le document nommé *Mapa de Pobreza Provincial y Distrital 2013* (« Carte de la Pauvreté des Provinces et des Districts 2013 », en espagnol) élaborée par l'INEI, presque 30 % de la population du district de Lurigancho-Chosica est considérée comme « pauvre » (INEI, 2015), avec une proportion similaire pour la ville de Chosica.

Cette carence économique est à l'origine de la présence de nombreux logements construits non pas en briques mais avec des matériaux fragiles (adobe, mur végétal en paille ou roseaux, entre autres) qui sont considérés comme vulnérables en cas d'inondation ou de lave torrentielle. Par exemple, avec la base de données de l'INEI de l'année 2007, 504

pâtés de maisons ont été considérés comme résidentiels sur la rive droite de la rivière Rimac au niveau de la ville de Chosica (8334 logements et 37278 habitants). Parmi eux, 104 pâtés de maison comprennent plus de 37,5 % de logement vulnérables, avec des niveaux de vulnérabilité fort ou très fort (Mejía, 2017) (figure 6).

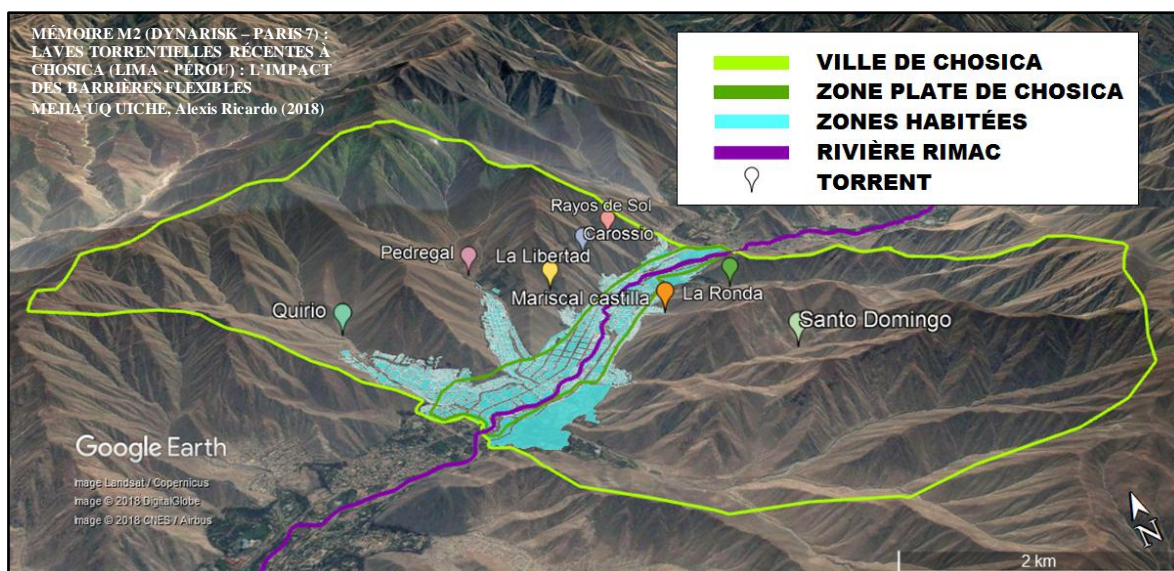


Figure 5. Localisation des zones habitées de la ville de Chosica selon le type de relief (zone plate et zone de collines)

SOURCE : GOOGLE EARTH, 2018 ; INEI, 2007
Elaboration personnelle



Figure 6. Logement construit avec des matériaux fragiles dans le torrent Pedregal

SOURCE : Ronchail, 2017

Cette analyse de la vulnérabilité des logements, conjointement avec celle de la vulnérabilité de la population (compte tenu du pourcentage de familles avec des personnes handicapées et du niveau d'entassement des logements) ont fourni une idée de la vulnérabilité globale des pâtés de maisons résidentiels de la rive droite de la rivière Rimac

au niveau de la ville de Chosica. Il en est résulté que 70 pâtés de maison sur 504, localisés surtout sur les pentes des collines où se trouvent les torrents, ont un niveau de vulnérabilité fort ou très fort (Ibid).

Après avoir croisé le niveau de vulnérabilité et le niveau d'aléa hydrologique, une carte du niveau de risque des pâtés de maisons résidentiels de la rive droite de la rivière Rimac a été dessinée pour la ville de Chosica (figure 7). Parmi les 504 pâtés de maisons, 171 (3182 logements et 11813 habitants) ont été catégorisés avec un niveau de risque fort ou très fort ; ils se trouvent surtout près des torrents (où peuvent se déclencher des laves torrentielles) et autour de la rivière Rímac (où peut se produire un débordement) (Ibid).

Dans le premier cas, 143 pâtés de maisons (2509 logements et 11813 habitants) auraient une grande probabilité d'être endommagés lors du déclenchement des 5 torrents qui se trouvent dans cette zone (Quirio, Pedregal, La Libertad, Carossio et Corrales) ; ceci peut produire des dégâts économiques et des pertes humaines, comme ce fut le cas à plusieurs reprises.

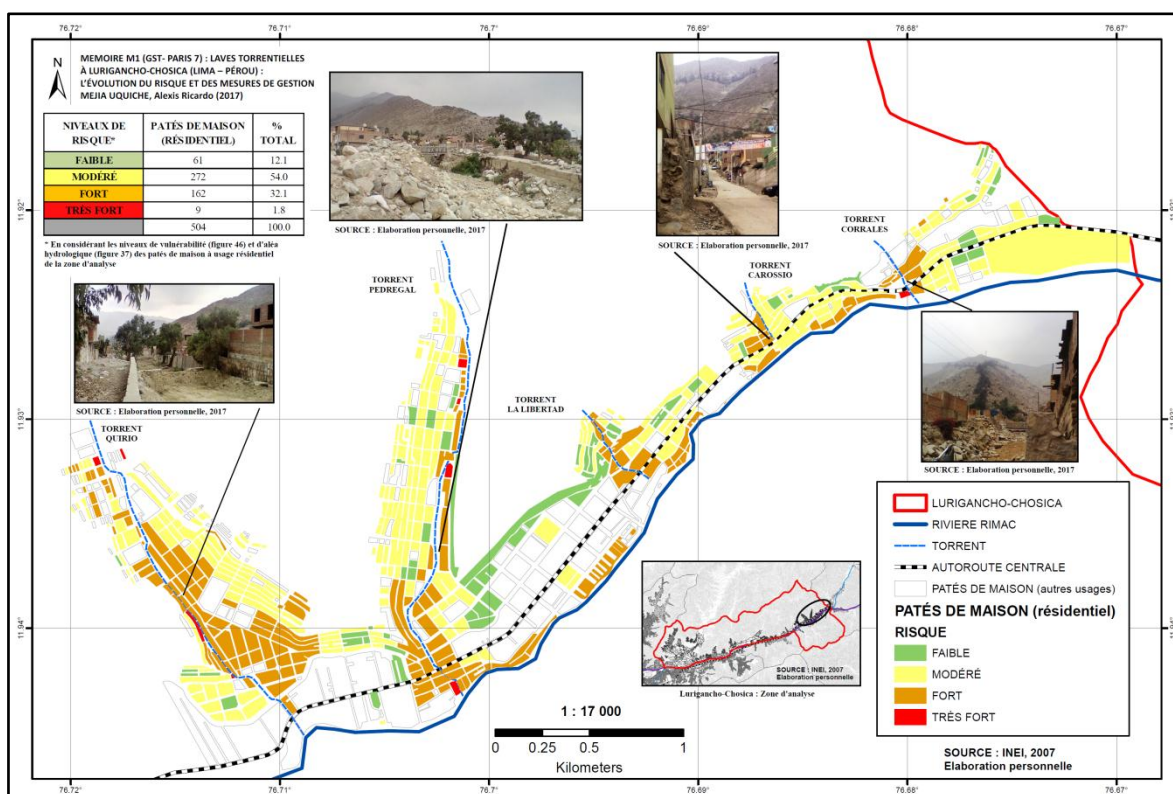


Figure 7. Niveaux de risque hydrologique des pâtés de maisons résidentiels de la rive droite de la rivière Rimac au niveau de la ville de Chosica

SOURCE : Mejía, 2017

1.2. CONSÉQUENCES DES DERNIERS ÉVÉNEMENTS DE LAVES TORRENTIELLES

Le déclenchement des torrents a gravement affecté la population présente sur les pentes des collines de la ville de Chosica comme en 1909, 1915, 1925, 1926, 1936, 1939, 1950, 1952, 1954, 1955, 1959, 1967, 1972, 1976, 1983, 1985 et 1987 (Abad, 2009) ; et depuis les années 1990, d'autres événements ont eu lieu en 1998, 2009, 2012, 2015 (Nuñez *et al.*, 2015), ainsi qu'au cours du premier trimestre de l'année 2017 (SINPAD-INDECI, 2018), c'est-à-dire, avec une fréquence comprise entre 2 à 5 ans (mairie de Lurigancho-Chosica, 2016).

Parmi tous ces événements, celui de l'année 1987 a été le plus catastrophique (100 décès et 1052 logements endommagés à cause du déclenchement des torrents de la rive droite de la rivière Rimac), raison pour laquelle, à partir de cet épisode, des mesures structurelles et non-structurelles ont été mises en place pour réduire le risque (Abad, 2009). Cependant, lors des laves torrentielles des années suivantes, il y a encore eu des dégâts importants, même au cours des dernières années.

Ci-dessous, les conséquences des trois derniers événements de laves torrentielles sur la zone d'étude (2012, 2015 et 2017) seront présentées en précisant non seulement la quantité et les types de dégâts, mais aussi les mesures structurelles et non-structurelles qui ont été mises en place après chaque événement.

1.2.1. Dommages et actions après la catastrophe de 2012

Le 05 avril 2012 vers 17h30 heure locale (UTC-05:00) (SINPAD-INDECI, 2018), à cause d'une forte précipitation de plus de 3 heures concentrée surtout sur la ville de Chosica, et les districts voisins Ricardo Palma et Chaclacayo, des laves torrentielles se sont produites dans 11 torrents entre les kilomètres 27 et 42 de l'Autoroute Centrale (depuis l'entrée de la ville de Chosica jusqu'au district voisin de Ricardo Palma), laquelle a été endommagée et bloquée pendant plusieurs heures (Guadalupe et Carrillo, 2012).

Les torrents déclenchés dans la zone d'étude ont été les suivants : La Ronda, Mariscal Castilla, Carossio, La Libertad, Santo Domingo, Quirio et Pedregal (Ibid), ceux de rive

gauche de la rivière Rimac étant les plus affectés, principalement autour du torrent Mariscal Castilla (communication personnelle le 23 février 2018, du chef du Centre d'Opérations de Secours Chosica – COE-CHOSICA, Monsieur José Martinez). Le rapport détaillé des dégâts consécutifs aux laves torrentielles est présenté en Annexe 1A.

Au total, 2 personnes sont décédées (noyées dans leurs logements), 21 personnes ont été blessées, 81 logements ont été détruits (20 dans le quartier Pablo Patrón), une école a été endommagée au point d'être inhabilitée, et pendant plusieurs mois, l'approvisionnement en eau et en électricité a été coupé et le réseau d'égouts a été inefficace dans les quartiers du torrent Mariscal Castilla (SINPAD-INDECI, 2018).

Une des raisons possibles pour laquelle les zones de la rive droite de la rivière Rimac ont eu moins de dégâts que celles de la rive gauche est que sur les torrents de la rive droite, des digues et des murs de protection avaient déjà été installés comme mesures de prévention après des épisodes de laves torrentielles destructifs. Pour aider les sinistrés et essayer d'avoir la situation sous contrôle, d'autres digues ont été construites dans les torrents, surtout dans ceux de la rive gauche de la rivière Rimac et ceux qui ont été déclenchés lors de cet épisode. Selon les déclarations du maire de Lurigancho-Chosica, pendant les années 2012-2013 par exemple, plusieurs digues ont été construites avec les ressources propres de la mairie, 4 sur Mariscal Castilla, 1 sur Carossio et 2 sur La Libertad) (Andina, le 28 octobre 2013) (figure 8) ; au total, en plus des 64 digues environ qui existaient déjà début 2013 (Peru21, le 23 janvier 2013) et qui avaient été construites depuis 2000 de manière progressive (Abad, 2009), il y avait, en comptant les 7 nouvelles digues, au minimum 71 digues sur les torrents du district de Lurigancho-Chosica à la fin du 2013 pour faire face aux événements futurs.

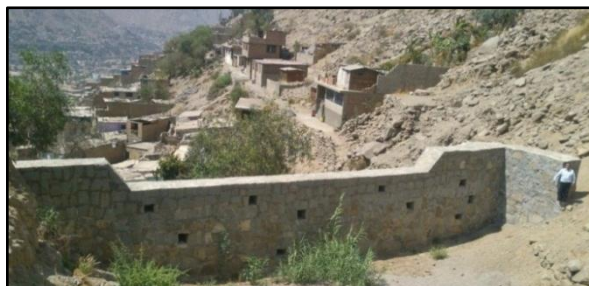


Figure 8. Digue construite dans le torrent La Libertad en 2013

SOURCE : Mairie de Lurigancho-Chosica, 2013
Extrait d'Andina, 2013

1.2.2. Dommages et actions après la catastrophe de 2015

En 2015, selon la mairie de Lurigancho-Chosica, des laves torrentielles se sont produites à quatre reprises. Les dates et les torrents déclenchés dans la zone d'étude sont les suivantes :

- 09 février 2015 : Pedregal et Quirio (SINPAD-INDECI, 2018)
- 20 mars 2015 : Pedregal et Quirio (Mairie de Lurigancho-Chosica, 2016)
- 21 mars 2015 : Pedregal et Quirio (Ibid)
- 23 mars 2015 : Pedregal, Quirio, La Libertad, Santo Domingo, Corrales (Rayos de Sol) et Carossio (COEN-INDECI, 2015)

Les laves torrentielles des 20 et 21 mars ont été faibles, sans aucun dommage important sur les logements ou les rues (communication personnelle le 23 février 2018, du chef du COE-CHOSICA, Monsieur José Martinez).

Cependant, celle du 09 février 2015 et surtout celle du 23 mars ont été enregistrées de manière officielle comme ayant généré des situations d'urgence par l'Institut national de défense civile du Pérou (INDECI) dans le Système d'information nationale pour la réponse et la réhabilitation de cette institution (SINPAD).

Les laves torrentielles du 09 février 2015 se sont produites vers 16h heures locale (UTC-05:00) pas seulement dans les torrents de Chosica, mais aussi dans le district voisin de Chaclacayo (dans le torrent Huampaní). L'Autoroute Centrale a été endommagée entre les km 27 et 30 (depuis l'entrée de la ville de Chosica jusqu'au niveau du torrent Pedregal), ce qui a produit des problèmes de transport pendant plusieurs heures. La population des deux torrents a été affectée : 1 personne est décédée (du torrent Pedregal) et 80 personnes ont été sinistrées, et des dizaines de logements ont été endommagés (SINPAD-INDECI, 2018).

Dans le cas des laves torrentielles du 23 mars 2015, vers 15h30 heure locale (UTC-05:00) (COEN-INDECI, 2015), au niveau du district de Lurigancho-Chosica, 15 torrents se sont déclenchés, dont 6 dans notre zone d'étude (SINPAD-INDECI, 2018).

Les laves torrentielles des torrents La Libertad et Santo Domingo ont produit des dégâts mineurs, ainsi que celles des torrents Quirio et Pedregal, où les flux se sont déplacés sans

déborder des lits, et donc, il y a eu seulement des dommages légers dans les logements très proches des chenaux (PREDES, 2015). Dans les torrents Carossio et Corrales, les dommages ont été sévères puisque 7 personnes sont mortes et des voies d'accès et des logements ont été abimés (récit détaillé de dégâts en Annexe 1B).

Selon le rapport du Centre d'Opérations de Secours National (COEN) de l'INDECI fait le 08 mai 2015, les dommages totaux ont été les suivants : 9 personnes décédées, 25 personnes blessées, 107 logements détruits et 341 logements endommagés. De plus, les laves torrentielles ont produit le blocage de 400 m de l'Autoroute Centrale, ensevelissant des dizaines de véhicules qui circulaient à ce moment-là (PREDES, 2015). Finalement, celle-ci a été ré-ouverte une semaine après, le 30 mars 2015 (COEN-INDECI, 2015).

Constatant que les dommages ont continué même avec la construction de digues et de murs de protection, et hâtivement, pour faire face à la menace de l'arrivée de fortes pluies lors du premier trimestre de 2016, le Ministère de l'Agriculture du Pérou (MINAGRI), par le biais de l'Autorité National de l'Eau (ANA), a décidé de mettre en place une nouvelle mesure structurelle pour réduire le risque à la fin de l'année 2015 (communication personnelle le 12 février 2018, d'un spécialiste de la Direction de Planification et Développement de Ressources Hydriques de l'ANA, Monsieur Juan Rodriguez). Cette mesure était l'installation de *Barreras Dinámicas* (« Barrières Dynamiques », en espagnol). Ce sont des filets métalliques de protection qui ont été installées à la fin de 2015 dans la partie supérieure des bassins versants torrentiels sur les 8 torrents de la zone d'étude (figure 9), avec l'objectif de retenir partiellement le volume de matériaux transportés par les laves torrentielles, et d'éviter la chute de grands blocs dans les zones basses où se trouve la population (ANA, 2015a). Les détails de cette nouvelle mesure structurelle sont présentés dans le chapitre 3 de ce document.

Par ailleurs, des mesures non structurelles, comme des ateliers de formation à la gestion du risque destinés à la population sont instaurés depuis 1998 (communication personnelle le 22 février 2017, du chef du COE-CHOSICA, Monsieur José Martinez). Cependant, après cet événement de 2015, les ateliers ont été renforcés par des projets comme celui du Disaster Preparedness ECHO³ programme – DIPECHO (traduit par « Programme de

³ ECHO : *The European Commission's Humanitarian Aid and Civil Protection department* (traduit par « Commission européenne pour l'aide humanitaire et la protection civile »)

préparation aux catastrophes d'ECHO »), qui a travaillé directement avec la population des torrents Mariscal Castilla et Carossio sur la sensibilisation au risque de catastrophe pendant deux ans à partir d'octobre 2015 (DIPECHO, 2016).



Figure 9. Barrera Dinámica installée dans le torrent La Libertad à la fin de l'année 2015

SOURCE : COE-CHOSICA, 2017

De plus, en octobre 2016, un système d'alerte précoce (SAP) pour prévenir du déclenchement de laves torrentielles a été installé par l'ONG Soluciones Prácticas et KOICA⁴ dans 4 torrents de Chosica : Carossio, La Libertad, Corrales et Pedregal. Ce système est composé de pluviomètres qui se trouvent sur les parties hautes de ces torrents, qui donnent des avis d'alerte à la population des torrents et au COE-CHOSICA quand ils enregistrent des quantités fortes de pluies (communication personnelle le 22 février 2017, du chef du COE-CHOSICA Monsieur José Martinez). Il y a deux niveaux d'alerte dans les quartiers: un premier, quand la quantité de pluie dépasse 3 mm (une sirène sonne par intermittence); et un second, quand elle dépasse 8 mm (une sirène sonne de façon continue) (communication personnelle le 23 février 2018, du chef du COE-CHOSICA, Monsieur José Martinez).

De cette manière, avec de nouvelles mesures structurelles et non structurelles, le district de Lurigancho-Chosica (et spécifiquement la ville de Chosica) s'est préparée pour réduire les dégâts des laves torrentielles à venir.

⁴ KOICA : *Korea International Cooperation Agency* (traduit par « Agence Coréenne de Coopération Internationale »)

1.2.3. Dommages et actions après la catastrophe de 2017

Dans un premier temps, le Comité multisectoriel chargé de l'Étude Nationale du Phénomène *El Niño* (ENFEN) avait prévu qu'une période de fortes pluies arriverait en 2016 ; cependant, celle-ci s'est présentée lors du premier trimestre de l'année 2017 (communication personnelle le 12 février 2018, d'un spécialiste de la Direction de Planification et Développement de Ressources Hydriques de l'ANA, Monsieur Juan Rodriguez), produisant des laves torrentielles et le débordement des rivières sur la côte péruvienne.

Dans notre zone d'étude, des débordements de la rivière ont été enregistrés à la mi-mars 2017, principalement à cause de l'augmentation du débit et à cause de la présence des laves torrentielles, qui se produisaient depuis janvier. Depuis 2017, le COE-CHOSICA élabore un enregistrement de la date des laves torrentielles et des torrents déclenchés au niveau du district de Lurigancho-Chosica, qui considère aussi des flux faibles (communication personnelle le 23 février 2018, du chef du COE-CHOSICA, Monsieur José Martinez). Le tableau 1 montre les torrents de la zone d'étude qui se sont déclenchés et les dates de ces événements, en 2017.

Tableau 1. Date et torrents déclenchés dans la ville de Chosica en 2017

DATE	TORRENTS ET LAVES TORRENTIELLES 2017							
	RIVE GAUCHE			RIVE DROITE				
	La Ronda	Mariscal Castilla	Santo Domingo	Corrales	Carossio	Libertad	Pedregal	Quirio
15/01/17		✓	✓					
16/01/17				✓	✓	✓	✓	
20/01/17					✓			
21/01/17		✓	✓	✓	✓			
23/01/17								✓
25/01/17	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
01/02/17	✓						✓	✓
17/02/17							✓	
27/02/17				✓	✓	✓		
01/03/17								✓
02/03/17							✓	
15/03/17				✓	✓	✓	✓	✓
16/03/17				✓	✓	✓	✓	✓
17/03/17							✓	✓

SOURCE : COE-CHOSICA, 2017

Parmi les 14 dates du tableau 1, 4 ont été enregistrées de manière officielle par le SINPAD-INDECI en raison de la présence de situations d'urgence : le 27 février, le 15 mars, le 16 mars et le 17 mars, journées pendant lesquelles se sont déclenchés les torrents de rive droite (SINPAD-INDECI, 2018).

Le 27 février (tableau 1), le torrent La Libertad s'est déclenché vers 15h10 et a produit des dommages faibles dans quelques logements, mais considérables sur certaines voies d'accès, où le système de distribution de l'eau et les réseaux d'égouts se sont effondrés à cause de l'érosion du sol. A Corrales, les laves torrentielles se sont déclenchées vers 15h20, et ont produit le blocage de l'Autoroute Centrale (Ibid).

Cependant, les 15, 16 et 17 mars (à 13h50, 15h10 et 19h respectivement), les laves torrentielles ont produit des dommages très sévères. Les 15 et 16, les 5 torrents de la rive droite de la zone d'étude se sont déclenchés, alors que le 17, deux seulement étaient devenus actifs, Pedregal et Quirio (rapport détaillé des dégâts du 16 mars en Annexe 1C). De plus, à cause de ces déclenchements, la rivière Rimac a monté, et des débordements ont été enregistrés le 16 et le 17, affectant des quartiers comme Los Módulos, Las Campiñas et Los Cañaverales, qui sont proches des torrents Quirio et Pedregal. Au total, selon les fichiers du SINPAD-INDECI, il n'y aurait eu aucun décès, mais 100 logements détruits (Ibid).

A la fin des événements du premier trimestre de l'année 2017 et après les travaux de secours et de réhabilitation, des actions liées à la gestion du risque de catastrophe par rapport aux laves torrentielles ont continué, principalement les travaux de nettoyage de débris, pour ceux qui se trouvent près des digues (par la mairie de Lurigancho-Chosica) et ceux retenus par les filets métalliques de protection (par l'ANA).

Puisqu'une grande partie du matériel a été retenue par les filets, le nettoyage des digues a été un travail moins important que les autres années. Les filets métalliques de protection n'ont été nettoyés qu'à partir de janvier 2018, car il n'y avait pas de budget au ministère en 2017 pour le faire (communication personnelle le 19 février 2018, du contrôleur général des travaux de nettoyage des Barrières Dynamiques de l'ANA, Monsieur Felix Caubi). Même si actuellement (mars 2018) le nettoyage des débris retenu par les filets métalliques de protection et leur renforcement (car quelques filets ont été affectés à cause des laves

torrentielles de 2017) sont en train de se terminer, l'ANA a été fortement critiquée par la population et par la mairie de Lurigancho-Chosica pour avoir commencé les travaux presque une année après les événements. Ils craignaient en effet que des laves torrentielles se produisent début 2018, qui puissent abîmer les filets, et qui puissent être encore plus intenses en déplaçant le matériel retenu par les filets l'année précédente (communication personnelle le 23 février 2018, du chef du COE-CHOSICA, Monsieur José Martinez).

Après les événements de 2017, il a été montré que le SAP, ce système d'alerte mis en place en 2015 pour prévenir de l'arrivée des laves torrentielles, n'est pas entièrement effectif, car il y eu des alertes pour des laves torrentielles qui ne se sont pas produites (car le déclenchement des laves torrentielles dépend aussi de la quantité des sédiments disponibles pour le transport), et, de ce fait, le système a perdu un peu de crédibilité (communication personnelle le 20 février 2018, du directeur de la sous-direction de Sciences de la Terre Solide de l'Institut de Géophysique du Pérou - IGP, Monsieur Juan Gomez). Toutefois, l'idée de considérer la pluie comme un facteur important pour prévoir d'éventuelles laves torrentielles est toujours valable (communication personnelle le 23 février 2018, du chef du COE-CHOSICA, Monsieur José Martinez), de telle manière que le système est toujours en vigueur ; il s'agit d'ailleurs de la mesure la plus valorisée par la mairie de Lurigancho-Chosica.

Même si les laves torrentielles de l'année 2017 n'ont pas occasionné de décès, les dommages ont été importants dans la zone d'étude, raison pour laquelle les mesures de gestion ont continué après les événements, avec l'objectif que les dégâts soient mineurs lors des prochaines laves torrentielles.

1.3. COMPARAISON DE L'INTENSITE DES LAVES TORRENTIELLES DE 2012, 2015 ET 2017

En complément de la partie précédente où les conséquences des laves torrentielles ont été montrées (les dégâts et les actions prises après la catastrophe), cette section évoque l'intensité des laves torrentielles en 2012, 2015 et 2017.

Comme mentionné précédemment, depuis 2017, le COE-CHOSICA enregistre non seulement les dates (tableau 1) mais aussi l'intensité des laves torrentielles, selon une

classification, à l'appréciation de ce bureau de la municipalité de Lurigancho-Chosica. Cette classification prend en compte tant le niveau de dommages que l'intensité du flux, en déterminant 4 niveaux : faible, modéré, fort, très fort (communication personnelle le 23 février 2018, du chef du COE-CHOSICA, Monsieur José Martinez). Le tableau 2 montre cette classification (qui est quelque peu imprécise et subjective car elle est réalisée en fonction de l'avis des personnes du COE-CHOSICA) pour les torrents de la zone d'étude.

Tableau 2. Date et intensité des laves torrentielles dans la ville de Chosica en 2017 selon le COE-CHOSICA

DATE	TORRENTS ET LAVES TORRENTIELLES 2017							
	RIVE GAUCHE			RIVE DROITE				
	La Ronda	Mariscal Castilla	Santo Domingo	Corrales	Carossio	Libertad	Pedregal	Quirio
15/01/17		Modéré	Fort					
16/01/17				Modéré	Modéré	Modéré	Modéré	
20/01/17					Fort			
21/01/17		Fort	Fort	Fort	Fort			
23/01/17								Modéré
25/01/17	Fort	Fort	Fort	Fort	Fort	Fort	Fort	Fort
01/02/17	Fort						Modéré	Modéré
17/02/17							Fort	
27/02/17				Fort	Fort	Fort		
01/03/17								Modéré
02/03/17							Fort	
15/03/17				Fort	Fort	Fort	Fort	Fort
16/03/17				Fort	Fort	Fort	Fort	Fort
17/03/17							Fort	Fort

NIVEAUX D'INTENSITÉ			
Faible	Modéré		Fort
Moyenne	Modéré		Très forte

SOURCE : COE-CHOSICA, 2017

Dans ce tableau 2, il est possible de distinguer qu'il n'y a pas de dates avec le niveau d'intensité faible et que parmi les 41 déclenchements (ou événements), 9 sont de niveau moyen (22,0 %), 19 de niveau fort (46,3 %), et 13 de niveau très fort (31,7 %). De plus, 8 déclenchements se sont produits dans des torrents qui se trouvent sur la rive gauche de la rivière Rimac (19,5 %), alors que les 33 autres (80,5 %), ont eu lieu dans les torrents qui se localisent sur la rive droite. Pedregal est celui qui a connu les plus de déclenchements (8

fois), suivi des torrents Quirio et Carossio (7 fois chacun). En ce qui concerne le niveau d'intensité selon le COE-CHOSICA, les 3 torrents mentionnées ci-dessus et le torrent Corrales, ont eu 2 fois chacun une lave torrentielle très forte, alors que le torrent La Libertad a eu 3 événements de ce niveau.

Cependant, nous présentons une autre classification qui prend en compte seulement l'intensité du flux qui arrive en aval, là où se localise la population, en considérant comme référence des documents bibliographiques sur les écoulements torrentiels.

Selon les études de Varnes (1978), les mouvements de terrain peuvent être décrits en considérant des informations sur le mode de déplacement (chute, basculement, glissement, extension latérale, écoulement, ou modalité complexe qui regroupe deux ou plusieurs modes de déplacement) et le type de matériau mobilisé (roche, débris ou matériel grossier, sol ou matériel fin). Les écoulements des torrents à Chosica ont un déplacement complexe. Cependant, ils pourraient être différenciés selon le matériel mobilisé. Donc, selon la classification de Meunier (1991), qui est basée sur le type de matériau concerné (cohésif ou granulaire) et la teneur en eau, il y aurait 5 groupes de mouvement de terrain, différenciés selon la quantité de charge solide (figure 10).

C'est ainsi que dans notre cas, nous pouvons distinguer deux types : des écoulements hyper-concentrés et des laves torrentielles. Parmi ces dernières, selon leur texture, deux grands types de laves torrentielles sont distingués (Blijenberg, 1998 ; Ancey, 2001) :

- Les laves torrentielles à matrice granulaire (*granular debris flow*), écoulement riches en matériaux sableux, gravillonnaire et rocheux (Blijenberg, 1998).
- Les laves torrentielles à matrice boueuse (*muddy debris flow*), écoulement où la quantité d'éléments grossiers est inférieure à celle des laves torrentielles granulaires, qui sont combinées avec des éléments fins (Ancey, 2001).

Considérant ces deux types de laves torrentielles, et sachant que l'écoulement hyper-concentré peut varier en intensité selon son volume, nous présentons dans le tableau 3, une classification propre de l'intensité de l'écoulement torrentiel, en prenant en compte le type de matériel concerné dans le flux. Dans le cas où le flux a été irrégulier le long de sa trajectoire, avec des rochers dans un tronçon supérieur (environ jusqu'à la partie centrale du bassin versant torrentiel) et de l'eau et de la boue (sous forme d'écoulement hyper-

concentré) dans son tronçon final (de la partie centrale du bassin versant jusqu'à son débouché), il est classifié comme « lave torrentielle à matrice boueuse ».

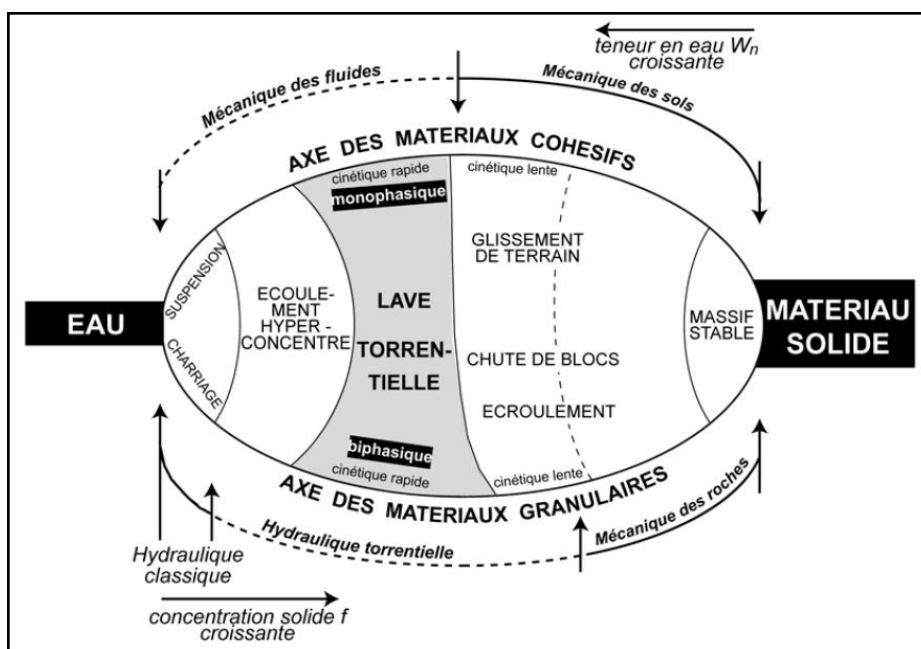


Figure 10. Classification des mouvements de terrain selon le type de matériau concerné et la teneur en eau

SOURCE : Meunier, 1991
Extrait de Remaître, 2006

Tableau 3. Niveaux d'intensité des écoulements des torrents de la ville de Chosica

NIVEAUX D'INTENSITÉ	TYPE D'ÉCOULEMENT TORRENTIEL
FAIBLE	Écoulement hyper-concentré d'un volume de moyenne-petite taille
MODÉRÉ	Écoulement hyper-concentré d'un volume de grande taille
FORT	Lave torrentielle à matrice boueuse
TRÈS FORT	Lave torrentielle à matrice granulaire

SOURCE : Elaboration personnelle

Si nous appliquons notre classification aux écoulements torrentiels enregistrés en 2017, leurs niveaux d'intensité varient par rapport à ceux qui ont été montrés dans le tableau 2, après prise en compte des témoignages sur la composition du flux de quelques habitants des quartiers de certains torrents (Pedregal, Quirio, Carossio, Corrales) et du chef du COE-CHOSICA pour tous les torrents de la zone d'étude. De plus, des témoignages et des documents d'institutions comme l'Université Nationale de San Marcos - UNMSM (Guadalupe et Carrillo, 2012), l'ONG PREDES (PREDES, 2015), l'Institut Géologique, Minier et Métallurgique du Pérou – INGEMMET (Nuñez et *al.*, 2015) et l'INDECI

(SINPAD-INDECI, 2018) ont été utilisés pour décrire la composition de chaque écoulement torrentiel produit en 2012 et 2015. Cette classification de l'intensité de tous les écoulements torrentiels qui arrivent à l'aval étudiés est présentée dans le tableau 4 ; dans celui-ci, de plus, le nombre de déclenchements par torrent et par niveau d'intensité est calculé. De plus, si on donne une valeur pour chaque niveau d'intensité (faible = 1 ; moyen = 2 ; fort = 3 ; très fort = 4) et si on l'attribue à chaque déclenchement correspondant, la somme de ces valeurs par torrent et par date nous permet d'avoir une valeur d'intensité globale pour chaque date.

Tableau 4. Date et intensité des écoulements torrentiels dans la ville de Chosica en 2012, 2015 et 2017

DATE	TORRENTS ET INTENSITÉ DES ÉCOULEMENTS TORRENTIELS								VAL. INT. 1/
	RIVE GAUCHE			RIVE DROITE					
	La Ronda	Mariscal Castilla	Santo Domingo	Corrales	Carossio	Libertad	Pedregal	Quirio	
05/04/12	4	4	2		4	4	2	2	22
09/02/15							3	3	6
20/03/15							2	2	4
21/03/15							2	2	4
23/03/15			2	4	4	2	3	3	18
15/01/17		1	2						3
16/01/17				1	1	1	1		4
20/01/17					2				2
21/01/17		2	2	2	2				8
23/01/17								1	1
25/01/17	3	2	3	2	2	2	2	2	18
01/02/17	2						1	1	4
17/02/17							2		2
27/02/17				2	2	2			6
01/03/17								1	1
02/03/17							2		2
15/03/17				2	2	3	3	3	13
16/03/17				2	2	3	4	4	15
17/03/17							2	2	4
V. INT. 1/	9	9	11	15	21	17	29	26	
# DECL	3	4	5	7	9	7	13	12	60
Total de déclenchements									
NIVEAUX D'INTENSITÉ ET QUANTITÉ D'ÉCOULEMENTS POUR CHAQUE TYPE									
Faible	9	15,0 %	Fort	10	16,7 %	Déclenc. rive gauche		12	20,0 %
Modéré	33	55,0 %	Très fort	8	13,3 %	Déclenc. rive droite		48	80,0 %

1/ Valeur d'intensité globale : Somme des valeurs de l'intensité de chaque déclenchement correspondant

SOURCE : SINPAD-INDECI, 2018 ; COE-CHOSICA, 2017 ; PREDES, 2015 ; Nuñez *et al.*, 2015 ; Guadalupe et Carrillo, 2012

Elaboration personnelle

Il est important de souligner que nous avons vraiment eu des hésitations pour catégoriser certains flux. Dans le cas de celui du 2012, la caractérisation des flux a été simple car les événements de l'unique jour où des laves torrentielles se sont produites (05 avril 2012) ont été bien détaillés par Guadalupe et Carrillo (2012), puisqu'ils décrivent le contenu des flux de chaque torrent déclenché (p.ex. pour le flux du torrent Mariscal Castilla : « ... et par la force de la lave torrentielle, qui transportait beaucoup de gros rochers, il a détruit plusieurs logements... » ; par rapport au flux du torrent Quirio : « ... la lave torrentielle était surtout boueuse... » (Guadalupe et Carrillo, 2012)). Cependant, pour les écoulements de 2015, il n'y a eu de documents similaires à celui de Guadalupe et Carrillo (2012) que pour l'événement du 23 mars 2015. PREDES (2015) et Nuñez *et al.* (2015) décrivent les flux (p.ex. pour ceux des torrents Corrales et Carossio : « les laves torrentielles, composés de boue et rochers de grandes dimensions... » (PREDES, 2015) ; pour le flux du torrent Pedregal : « Le matériel de cet événement contenait des blocs de rochers... Dans l'embouchure, le flux était boueux... » (Nuñez *et al.*, 2015)). Dans le cas des autres événements de 2015, la classification a été plus compliquée car l'information est basée seulement sur le témoignage du chef du COE-CHOSICA pour les flux des 20 et 21 mars 2015 (flux composé par de l'eau et de la boue d'intensité modérée), et l'information donnée par le fichier du SINPAD-INDECI pour le flux du 09 février 2015 («... flux de rochers et de boue... » (SINPAD-INDECI, 2018)). Dans ce dernier cas, c'est seulement en observant qu'il n'y a eu que des dégâts légers, qu'il a été assumé que le flux n'était pas composé d'une grande quantité de roches. Finalement, dans le cas des flux du 2017, aucun document technique élaboré par une institution scientifique comme dans les cas précédents n'a été trouvé, raison pour laquelle, la catégorisation a été fondée sur l'information des fichiers du SINPAD-INDECI, mais surtout sur les témoignages de certains habitants des quartiers localisés sur quelques torrents étudiés et sur celui du chef du COE-CHOSICA, ainsi que sur l'information présentée dans le tableau 2. Donc, afin de bien classer les flux, les avis sur les événements de 2017 ont été évalués et comparés. Tel est le cas par exemple des flux à Carossio, où le président du comité directeur des habitants du quartier Buenos Aires (localisé dans ce torrent) a dit que tous les flux de cette année-là ont été constitués d'eau et de boue, et que des dégâts ont été enregistrés seulement le 15 mars 2017. Précisément l'enregistrement de dommages serait la raison pour laquelle le COE-CHOSICA aurait donné au flux de ce jour-là la catégorie de « très forte »⁵ ; mais en termes

⁵ Classification de l'intensité des laves torrentielles faite par le COE-CHOSICA qui considère en plus de l'intensité du flux, le niveau de dommages (tableau 2)

d'intensité et de contenu du flux (selon notre classification), en considérant les caractéristiques présentées ci-dessus, le flux n'a qu'un niveau « modéré ».

Donc, à partir du tableau 4, nous pouvons observer que sur un total de 60 écoulements enregistrés entre 2012 et 2017, 48 se produisent dans les torrents qui se trouvent sur la rive droite de la rivière Rímac, alors que ceux qui se trouvent sur la rive gauche ont produit 12 écoulements, c'est-à-dire, un quart de ceux de la rive droite. Cette situation montre que les torrents de la rive droite sont les plus susceptibles à la production d'écoulements torrentiels (et de laves torrentielles aussi) ; ce sont Pedregal, Quirio et Carossio qui ont le plus grand nombre de déclenchements (13, 12 et 9 respectivement).

En ce qui concerne l'analyse de l'intensité des écoulements, sur 60 évènements, 33 (55 % - plus de la moitié) ont un niveau d'intensité modéré (écoulement hyper-concentré d'un volume de grande taille), suivi de loin par 10 (16,7 %) qui ont un niveau d'intensité fort (lave torrentielle à matrice boueuse). De plus, au niveau de l'intensité globale par torrent (la somme des valeurs de l'intensité de chaque jour dans un torrent), les trois torrents avec le plus grand nombre de déclenchements (Pedregal, Quirio et Carossio) sont ceux qui ont aussi la valeur d'intensité globale la plus élevée. Par ailleurs, si on fait l'analyse par date, nous pouvons voir que les 8 torrents de la zone d'étude ont été déclenchés le 25/01/2017, et 7 des 8 torrents le 05/04/2012. Cependant, au niveau de l'intensité globale par date (la somme des valeurs d'intensité de chaque torrent un jour donné), la situation est inverse, car la date avec les écoulements les plus intenses est le 05/04/2012 (avec 4 évènements d'intensité très forte et 3 d'intensité modéré), suivie de loin par le 23/03/2015 (avec 2 évènements d'intensité très forte, forte et modéré) et par le 25/01/2017 (aucun cas d'intensité très forte, 2 d'intensité forte et les 6 autres d'intensité modérée).

Finalement, le tableau 5 nous donne une vision d'ensemble des laves torrentielles (et des écoulements hyper-concentrés) dans la zone d'étude pour chaque année 2012, 2015 et 2017. Sur les 60 écoulements, 41 correspondent à l'année 2017 (68,3 %), 12 à 2015 (20 %) et 7 à 2012 (11,7 %). Cependant, par rapport à l'intensité, l'ensemble des écoulements forts et très forts ont été inférieurs en 2017 (19,5 %) à ceux de 2015 (50 %) et de 2012 (57,1 %). Alors, même si l'enregistrement des évènements de 2017 a été plus détaillé, incluant des écoulements très faibles (ce qui n'a peut-être pas été fait en 2012 et 2015), il est clair que de toute façon la quantité d'écoulements a été plus élevée en 2017, mais que ces

écoulements ont été moins forts en général que ceux des années précédentes, 2015 et 2012, sauf ceux des 15 et 16 mars 2017 qui ont été forts, mais pas autant que ceux du 23 mars 2015 ou du 05 avril 2012.

Tableau 5. Ensemble des écoulements torrentiels selon le niveau d'intensité dans la ville de Chosica en 2012, 2015 et 2017

NIVEAUX D'INTENSITÉ	2012		2015		2017	
	#	%	#	%	#	%
FAIBLE	0	0,0	0	0,0	9	22,0
MODÉRÉ	3	42,9	6	50,0	24	58,5
FORT	0	0,0	4	33,3	6	14,6
TRÈS FORT	4	57,1	2	16,7	2	4,9
TOTAL	7	100,0	12	100,0	41	100,0
% DU TOTAL 2012-2017 (60)	11,7		20,0		68,3	

SOURCE : SINPAD-INDECI, 2018 ; COE-CHOSICA, 2017 ; PREDES, 2015 ; Nuñez *et al.*, 2015 ; Guadalupe et Carrillo, 2012
Elaboration personnelle

CHAPITRE II

LES PRÉCIPITATIONS ET L'INTENSITE DES LAVES TORRENTIELLES À CHOSICA, UNE RELATION DIRECTE ?

2.1. PRÉCIPITATIONS SUR LA CÔTE PÉRUVIENNE ET VARIABILITÉ LIÉE À L'ENSO

La précipitation, qui est définie comme l'eau qui tombe sur la surface terrestre, tant de manière liquide (pluie) que solide (neige, grêle) (Segeer et Villodas, 2006), est une composante principale du cycle hydrologique, dans lequel existe une interaction entre l'océan, l'atmosphère et la croûte continentale (USGS, 2018) (figure 11).

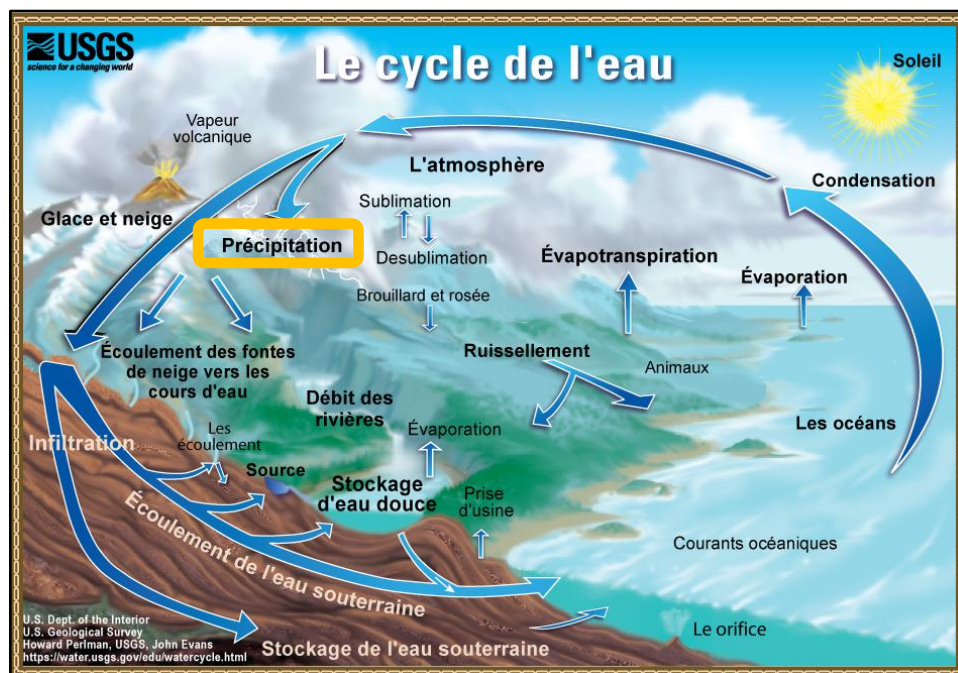


Figure 11. Le cycle de l'eau (la précipitation comme une des composantes principales)

SOURCE : USGS, 2018

Afin d'expliquer ce cycle, il est possible d'assumer qu'il commence quand une partie de l'eau de l'océan s'évapore grâce à l'énergie solaire. Cette vapeur d'eau, conjointement avec celle issue de l'évapotranspiration des plantes et de la transpiration des animaux et

des personnes, est conduite vers l'atmosphère par des courants d'air ascendants ; la détente de l'air humide donne lieu à son refroidissement ce qui diminue sa capacité à contenir de la vapeur d'eau, et aboutit à sa saturation et sa condensation, en présence de noyaux de condensation. Les gouttelettes d'eau et les cristaux de glace forment des nuages dans lesquels leur taille augmente, ce qui donne lieu à des précipitations. L'eau de pluie retourne en partie dans l'océan, une autre partie s'infiltre dans le sol vers les nappes souterraines, une autre s'accumule dans les glaciers ou dans des dépressions à la surface de la Terre (lacs et mares) et une autre encore ruisselle avant de former rivières et torrents. Toutes ces eaux en mouvement, même après un long laps de temps, retournent à l'océan, où le cycle se termine et recommence (Ibid).

Quand on observe ce système, il apparaît qu'en présence d'une anomalie dans l'océan ou dans l'atmosphère (anomalie de température par exemple), l'évaporation ou la condensation peuvent faire varier les autres phases du cycle hydrologique, affectant dans ce cas, le niveau de précipitations normal dans une zone déterminée. Et, en effet, des phénomènes naturels affectent le cycle de l'eau sur la côte péruvienne, où se localise notre zone d'étude (la ville de Chosica).

2.1.1. Les pluies moyennes

Comme il a été mentionné dans le sous-chapitre « 1.1. Description de la zone d'étude », la côte péruvienne est une zone presque désertique (contrairement à ce qui devrait être observé car elle est localisée dans une zone tropicale, au bord de l'océan...) à cause du courant de Humboldt provenant de hautes latitudes, donc froid, et de la remontée d'eaux froides de profondeur (*l'upwelling*). Les deux courants abaissent la température de surface de l'océan (TSO) qui est plus faible que celle observée en moyenne à la latitude de Lima (12°S), donc abaissent la température de l'air qui est froid et dense et renforce ainsi l'anticyclone subtropical du Pacifique sud (Tumialán, 2015).

Cet anticyclone est la cause principale de la stabilité atmosphérique dans la région Ouest de l'Amérique du Sud tropicale. L'affaissement de l'air lié à l'Anticyclone, entraîne sa compression, son échauffement et son écart de la saturation, donc l'absence de pluie. L'affaissement est renforcé à la base par les températures faibles de l'océan et de l'air liées à *l'upwelling* et au courant de Humboldt, ce qui génère une inversion thermique dans les basses couches de l'atmosphère.

Cependant, il est important de dire qu'il y a des bassins versants dont les rivières se forment dans les Andes mais qui se jettent sur la côte péruvienne (p. ex. le bassin versant de la rivière Rimac, où se trouve la ville de Chosica), ce qui produit des écoulements sur la côte péruvienne. En effet, il pleut dans les Andes, au-dessus de la couche d'inversion thermique, en relation avec le flux de mousson humide venant de l'Atlantique qui se met en place en été austral et se retire en hiver vers l'hémisphère nord.

2.1.2. La variabilité des pluies liée à l'ENSO

Cependant, le scénario peut devenir encore plus complexe, car face aux conditions normales du cycle hydrologique sur la côte péruvienne, d'autres phénomènes peuvent se présenter dans l'océan et l'atmosphère, modifiant ainsi la fréquence et l'intensité des précipitations. L'un des plus fréquents (tous les deux à sept ans) est le phénomène climatique appelé *El Niño - Southern Oscillation – ENSO* (traduit par « El Niño - Oscillation Australe »). Il correspond à une « situation anormale » des températures de surface de la mer sur le Pacifique : des eaux plus chaudes que la normale apparaissent à l'Est (du côté de l'Amérique du Sud) et affaiblissent l'anticyclone du Pacifique Sud (Zambrano, 1986), ce qui fait que les précipitations sur la côte péruvienne pendant cette période soient plus fortes que d'habitude. Une description du phénomène ENSO (plus connu sous le nom d'*El Niño* en ce qui concerne la phase chaude de l'oscillation) est présentée dans l'annexe 2.

Donc, il y a une relation entre l'arrivée d'*El Niño* (et aussi *La Niña*⁶) et des anomalies dans la fréquence et l'intensité des précipitations, qui a été analysée dans différentes études (Zambrano, 1986 ; Aceituno, 1993 ; Delecluse, 1999 ; Dewitte, 2001 ; McPhaden *et al.*, 2006 ; Lavado et Espinoza, 2014 ; Bourrel *et al.*, 2015 ; Sanabria *et al.*, 2018 ; Sulca *et al.*, 2018).

a. Indice d'Oscillation Australe et pluie au Pérou

Une manière de classer ces phénomènes (*El Niño* et *La Niña*) est de considérer la valeur du *Southern Oscillation Index – SOI* (traduit par « Indice d'Oscillation Australe – IOA »),

⁶ *La Niña* : Phénomène climatique où la température de la surface de la mer sur le Pacifique Est (du côté de l'Amérique du Sud) est plus froide que d'habitude, avec une configuration plus ou moins opposée à celle d'*El Niño* (Dewitte, 2001)

qui est la différence normalisée de la pression atmosphérique au niveau de la mer mesurée à Papeete (Tahiti, pour le Pacifique Est) et à Darwin (Australie, pour le Pacifique Ouest). L'IOA étant négatif lors d'un *El Niño* et positif lors de *La Niña*, il est possible de faire une classification en 4 catégories pour la période 1965 - 2007 (en considérant les années hydrologiques entre septembre et août) : *El Niño* fort – ENF (IOA < -10), *El Niño* modéré – ENM (-10 ≤ IOA ≤ -5), *La Niña* modérée (5 ≤ IOA ≤ 10) et *La Niña* forte – LNF (IOA > 10) (Lavado et Espinoza, 2014) (tableau 6).

Tableau 6. Phénomènes *El Niño* et *La Niña* forts et modérés entre 1965 et 2007 selon la valeur de l'IOA

IOA	CATEGORIE	QUANTITÉ	ANNÉES (SEPTEMBRE-AOUT)
< -10	EL NIÑO FORT (ENF)	3	1982-1983, 1991-1992, 1997-1998
[-10 ; -5]	EL NIÑO MODERE (ENM)	11	1965-1966, 1972-1973, 1977-1978, 1986-1987, 1987-1988, 1992-1993, 1993-1994, 1994-1995, 2002-2003, 2004-2005, 2006-2007
[5 ; 10]	LA NIÑA MODEREE (LNM)	4	1974-1975, 1998-1999, 1999-2000, 2000-2001
> 10	LA NIÑA FORTE (LNF)	4	1970-1971, 1973-1974, 1975-1976, 1988-1989
TOTAL PHENOMENES (EL NIÑO / LA NIÑA)		22	

SOURCE : Lavado et Espinoza, 2014

En analysant les précipitations enregistrés dans 155 stations hydrographiques (distribués dans les 3 bassins hydrographiques du Pérou : celui du Pacifique, celui du Lac Titicaca et celui de l'Amazone)⁷, il est possible d'observer quelques anomalies pour les années où ces phénomènes se sont produits, principalement pendant les événements forts (ENF et LNF - figure 12). Lors des années ENF, les précipitations moyennes annuelles ont enregistré une hausse de 50 à 150 mm dans presque toutes les stations du nord du bassin hydrographique du Pacifique, alors que les bassins du Lac Titicaca et d'Amazonie ont présenté une diminution de presque 50 mm (figure 12a). Par ailleurs, lors des années LNF, les précipitations ont augmenté de 0 mm à 50 mm dans les 3 bassins hydrographiques (figure 12c). Cependant, pendant les années *El Niño* ou *La Niña* modérées, les variations ont été mineures (figure 12b et 12d). De plus, la figure 12 montre qu'il n'y a pas de variation

⁷ Enregistrements mensuels entre 1965 et 2007 de 155 stations hydrographiques distribués sur les bassins hydrographiques du Pérou : 85 dans celui du Pacifique, 21 dans celui du Lac Titicaca et 49 dans celui de l'Amazone (Lavado et Espinoza, 2014)

significative des pluies pendant les années ENSO dans la région centrale de la côte péruvienne où se trouve Lima.

Alors, compte tenu des faibles liens entre IOA et pluies sauf pendant les événements extrêmes, Lavado et Espinoza (2014) ont conclu que la classification selon l'IOA, calculé à partir des valeurs de pression de part et d'autre du Pacifique, n'est pas suffisante pour caractériser les précipitations pendant les événements ENSO.

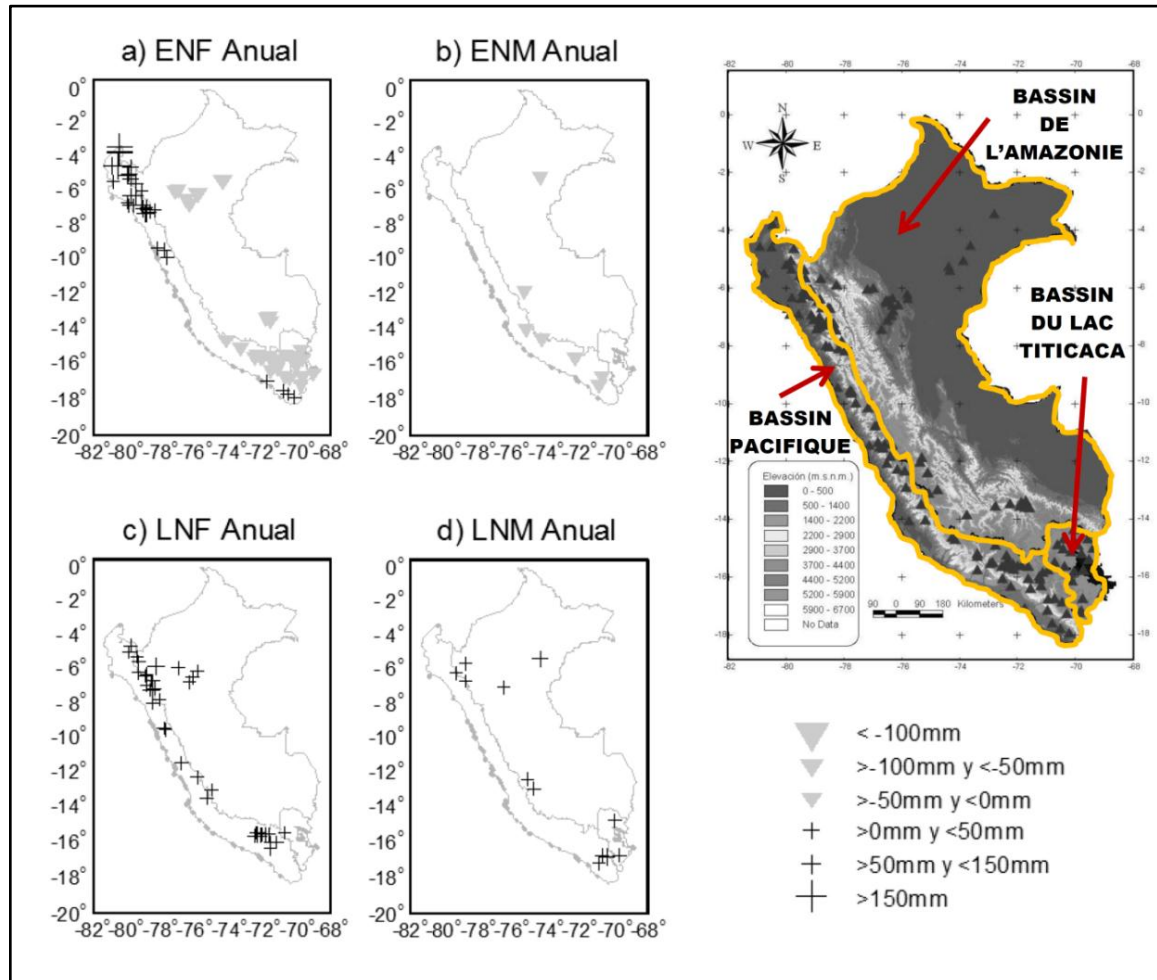


Figure 12. Graphique spatiale des variations des précipitations moyennes annuelles pour les différents phénomènes d'El Niño et La Niña (1965-2007),

- (a) Variation moyenne annuelle pendant *El Niño* fort – ENF,
- (b) Variation moyenne annuelle pendant *El Niño* modéré – ENM,
- (c) Variation moyenne annuelle pendant *La Niña* forte – LNF,
- (d) Variation moyenne annuelle pendant *La Niña* modérée - LNM

SOURCE : Lavado et Espinoza, 2014

b. Température de surface océanique sur le Pacifique et pluies sur la côte péruvienne

D'autres indices sont aussi utilisés pour analyser les relations ENSO-pluies, par exemple la « température de surface océanique – TSO » calculée dans différentes régions du Pacifique Equatorial : Niño 1+2, Niño 3, Niño 3.4 et Niño 4 (NOAA, 2018) (figure 13).

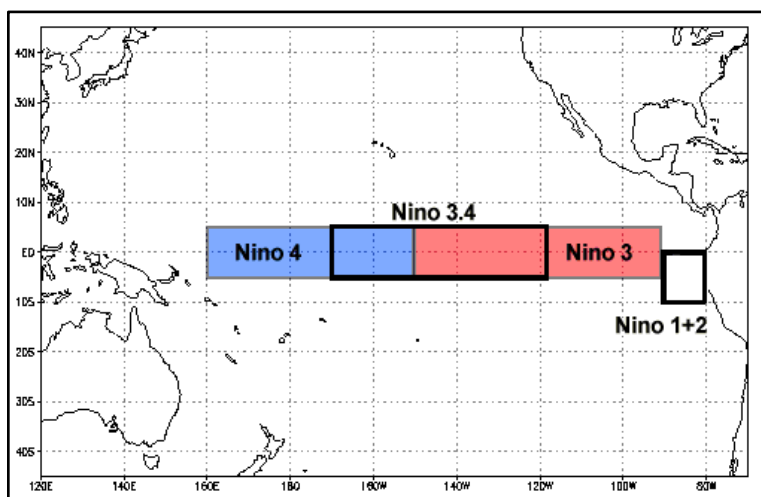


Figure 13. Régions du Pacifique Equatorial pour l'analyse de la TSO

SOURCE : NOAA, 2018

En appliquant une analyse factorielle sur les TSO de deux des régions présentées ci-dessus (Niño 3.4 et Niño 1.2, où les eaux se réchauffent durant *El Niño*), Takahashi *et al.* (2011) a mis au point les indices E et C pour montrer la variation de la TSO dans l'est (index E) et dans le centre (index C) du Pacifique Equatorial (Sanabria *et al.*, 2018). Grâce à ces indices, il est possible de reconnaître l'arrivée d'*El Niño* et *La Niña*, ainsi que leur intensité sur la base de la variation de la TSO (en degrés C°) dans ces deux régions (IGP, 2018a) (figure 14). De manière similaire à ce qui a été obtenu avec une classification selon la valeur de l'IOA (tableau 6), il est possible, avec l'index E (région 1+2 de la figure 13), de distinguer que le phénomène le plus fort d'*El Niño* a été enregistré en 1997-1998 (hausse de la TSO de 4 °C), suivi de celui de 2015-2016 (hausse de la TSO de 2 °C), alors qu'avec l'indice C (région 3.4 de la figure 13), il y a plusieurs dates différentes où la TSO a augmenté d'environ 1 °C ou 2 °C.

Il apparaît donc que le Pacifique central et le Pacifique oriental ne s'échauffent pas toujours en même temps ou avec la même intensité.

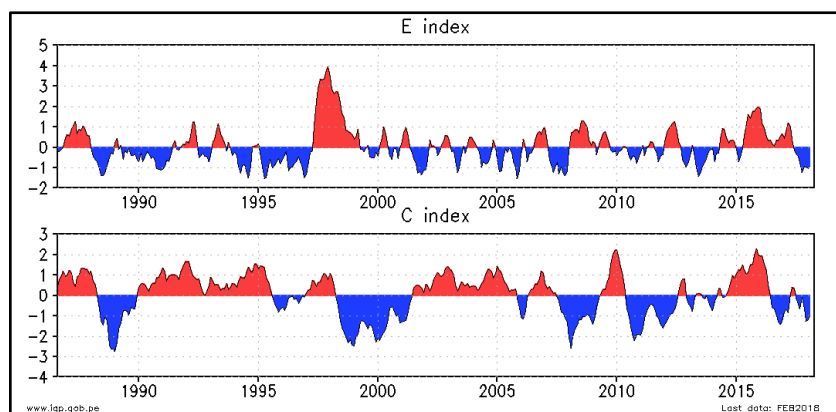


Figure 14. Variation de la TSO selon les indices E et C

SOURCE : IGP, 2018a

Cependant, Sanabria *et al.*, 2018, qui ont travaillé avec ces indices E et C (qui décrivent d'une certaine façon les différents comportements du phénomène *El Niño*) et l'application d'une autre analyse factorielle afin de caractériser la variabilité des précipitations pour les phénomènes *El Niño* les plus forts (1972-1973, 1982-1983, 1997-1998 et 2015-2016)⁸ n'ont pas trouvé une corrélation bien établie entre types d'ENSO et pluies. Ils concluent que lors des 4 *El Niño* forts dans la région El Niño 1+2, où se trouve la côte péruvienne (et la ville de Chosica), des augmentations de la TSO et des précipitations se sont présentés simultanément sans qu'il y ait proportionnalité entre pluie sur la côte et indice E. Cette relation non proportionnelle est aussi décrite par Bourrel *et al.* (2015).

c. El Niño Costero et les pluies sur la côte péruvienne

En plus du phénomène *El Niño* et de ses causes qui ont été étudiés longuement depuis les années 1970 (p.ex. Bjerknes, 1969), et qui impliquent des processus physiques dans l'ensemble du Pacifique équatorial, un phénomène annexe et peu fréquent s'est manifesté fortement au premier trimestre de l'année 2017, appelé *El Niño Costero* (« Le Niño côtier », en espagnol). Selon le Ph. D Ken Takahashi, chercheur de l'Institut de Géophysique du Pérou (IGP), *El Niño Costero* est une terminologie introduite en 2012 par le Comité multisectoriel chargé de l'Étude Nationale du Phénomène El Niño (ENFEN) afin de le différencier du phénomène *El Niño* (Sophimania, le 16 mars 2017). Puisqu'*El Niño*

⁸ Enregistrements mensuels entre 1964 et 2016 de 145 stations hydrographiques distribués dans 9 zones de la côte péruvienne, qui inclut aussi des zones de montagnes proches de la cordillère des Andes. La délimitation et le choix de ces zones ont été réalisées selon la méthodologie de Brunet-Moret (1979), cité dans Bourrel *et al.* (2015), en considérant qu'elles possèdent des conditions pluviométriques, topographiques et physiologiques presque homogènes (Sanabria *et al.*, 2018)

Costero est un phénomène qui a été enregistré de manière remarquable seulement en 1925 et en 1891 (Garraud, 2018), il n'a pas été beaucoup étudié et est peu présent dans la bibliographie scientifique.

Garraud (2018), qui a étudié *El Niño Costero* avec des indicateurs (la majorité entre 1870 et 2017) comme les composantes zonale et méridienne du vent, la TSO, la *Outgoing Longwave Radiation* – ORL (traduit par « rayonnement sortant de grande longueur d'onde »), les indices Niño 3.4 et Niño 1+2 (indices C et E), l'IOA et les précipitations mensuelles enregistrés au Pérou, a montré des différences entre *El Niño* et *El Niño Costero*. Si on observe par exemple la variation de la TSO (en °C) des régions 1+2 et 3.4 et de l'IOA en janvier-février-mars (JFM) (figure 15), nous pouvons voir qu'en 1998, 1983, 1878 et aussi en 2016 (où il n'y a pas eu des précipitations fortes sur la côte péruvienne), la variation de la TSO a été considérable (plus de +2° en Niño 3.4 et plus de +1° en Niño 1+2) ainsi que l'IOA (moins de -2 dans tous ces cas). Cependant, en 1925 et 2017, même s'il y a eu une augmentation de la température de la région Niño 1+2 de presque 0,25 °C et 1 °C respectivement (cette dernière figurant parmi les plus fortes), il y a eu des diminutions de -0,7 °C et -0,2 °C pour la région Niño 3.4 et les valeurs d' IOA étaient comprises entre 0 et 1 (figure 15). Donc, l'échauffement n'a concerné que l'est du Pacifique tropical et l'IOA positive n'a pas reflété un *El Niño* « habituel ». En effet, *El Niño Costero* n'affecte pas l'Ouest du Pacifique mais est un phénomène très localisé à l'extrême est du Pacifique, à l'est de la région Niño 1+2, tout contre la côte. *El Niño Costero* est lié à une « Zone de Convergence Inter-Tropicale – ZCIT »⁹ secondaire, localisée environ à la latitude de Piura (nord du Pérou), liée à l'affaiblissement des vents du sud-est (lui-même lié à l'affaiblissement de l'Anticyclone du Pacifique est). Cet affaiblissement favorise l'arrivée d'eaux chaudes du nord-ouest de l'Amérique Centrale qui font augmenter rapidement la TSO de la côte péruvienne et de l'Equateur en très peu de temps et de manière inattendue (Takahashi, 2017) (p.ex. sur la côte de La Libertad, au nord du Pérou, la TSO est passée de 17 °C à 27 °C en deux semaines vers mi-janvier 2017) (ENFEN, 2017), ce qui est exceptionnel.

⁹ La localisation de la ZCIT, qui est la bande où les vents alizés du nord-est et sud-est convergent, se trouve en conditions normales presque au niveau d'Amérique Centrale, au nord de l'équateur (Takahashi, 2017).

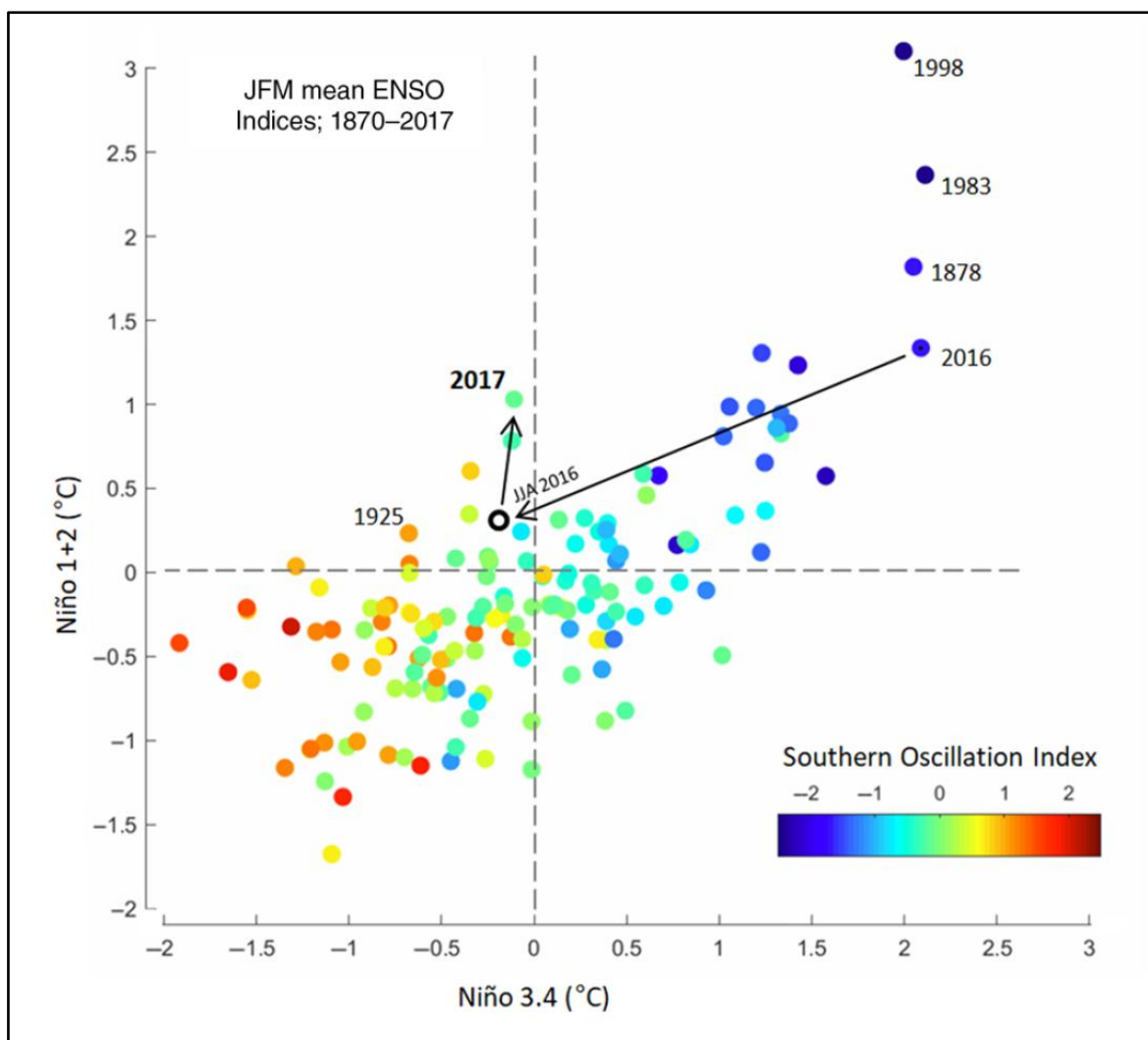


Figure 15. Variations de la TSO (en Niño 1+2 et en Niño 3.4) et de l'IOA pendant les premiers trimestres de 1870 à 2017

SOURCE : Garreaud, 2018

Donc, dans la région Niño 1+2, la hausse en JFM 2017 a été en moyenne de 1 °C, avec une valeur maximum en mars d'environ 4 °C, comparable à celle des étés 1998 et 1983, mais pour d'autres raisons physiques (Takahashi et Martinez, 2017 ; Takahashi *et al.*, 2018 ; Garreaud, 2018), qui ne concernent que l'est du Pacifique. Ces trois événements ont produit les précipitations les plus fortes du dernier siècle sur la côte péruvienne, et par conséquent, des pertes économiques liées aux inondations et aux laves torrentielles. Dans le cas d'*El Niño* 1997-1998 les pertes se sont élevées à 1 milliard de dollars (le PIB national a chuté de 12 % cette année-là) (Lavado et Espinoza, 2014), et dans le cas d'*El Niño Costero* 2017 à 3,1 milliard de dollars (presque 1,5 % du PIB national de 2017) (Macroconsult, 2017).

En conclusion, même si les pluies ne sont pas proportionnelles aux valeurs des indices d'*El Niño* sur la côte péruvienne (raison pour laquelle les études continuent, pour mieux comprendre la situation océano-atmosphérique de cette zone), il est clair que lors des phénomènes extrêmes (*El Niño* de 1982-1983, *El Niño* de 1997-1998, *El Niño* 2015-2016 et *El Niño Costero* 2017) les précipitations augmentent sur la côte péruvienne. Dans la section suivante, les précipitations de notre zone d'étude seront analysées, en particulier lors des événements *El Niño*.

2.2. ANALYSE DES PRÉCIPITATIONS À CHOSICA

2.2.1. Les différents types d'enregistrements

Aujourd'hui (avril 2018), il y a 3 types de sources qui peuvent nous permettre d'estimer les pluies à Chosica : les enregistrements par des pluviomètres, les données d'un produit issu du traitement d'information satellite de précipitation et d'enregistrements de pluviomètres, et les enregistrements d'un radar météorologique. Ces différentes sources sont décrites ci-dessous.

a. Pluviomètres

Le pluviomètre est défini comme l'instrument destiné à mesurer la quantité de pluie qui tombe en un lieu déterminé (AMS, 2018). Dans le district de Lurigancho-Chosica, selon l'entité responsable de leur installation, il y a trois groupes de pluviomètres :

- Les pluviomètres du Service National de Météorologie et d'Hydrologie du Pérou - SENAMHI ; installés dans des stations pluviométriques. Il y en a deux dans le district (un dans la ville de Chosica et un dans la partie sud-ouest du district, plus proche à Lima) (communication personnelle le 26 février 2018, d'une spécialiste de la sous-direction d'Études et de Recherches Hydrologiques du SENAMHI, Madame Sofía Endara).
- Les pluviomètres installés par l'ONG Soluciones Prácticas et le KOICA¹⁰ ; ils sont installés dans le service du Système d'Alerte Précoce (SAP) du district de Lurigancho-Chosica pour prévenir du déclenchement de laves torrentielles et

¹⁰ KOICA : *Korea International Cooperation Agency* (traduit par « Agence Coréenne de Coopération Internationale »)

donner l'avis d'alerte quand des quantités fortes de pluies sont enregistrées. Ces pluviomètres, qui se trouvent sur les parties hautes des torrents, étaient au nombre de 4 au début des mesures (environ en octobre 2016), localisés sur les torrents Carossio, La Libertad, Corrales et Pedregal. Ils ont enregistré la quantité de pluie pendant les événements du premier trimestre 2017. Cependant, avec l'appui de la municipalité de Lurigancho-Chosica, 3 de plus ont été installés (sur les torrents Mariscal Castilla, Quirio et La Ronda), ce qui fait qu'il y en a 7 au total depuis les derniers mois de 2017 (communication personnelle le 23 février 2018, du chef du COE-CHOSICA, Monsieur José Martinez).

- Les pluviomètres artisanaux ; leur utilisation est promue par le COE-CHOSICA depuis le début de 2018, afin que chaque comité directeur des habitants des quartiers localisés sur des zones menacées par des laves torrentielles ait le sien, notamment là où il n'existe pas encore de SAP. Pour cette raison, le COE-CHOSICA a organisé des ateliers destinés surtout aux leaders de quartier du district pour enseigner comment fabriquer ces pluviomètres avec des objets courants et comment les utiliser (figure 16). Même si les mesures présentent des erreurs par rapport aux pluviomètres du réseau officiel, elles ne sont pas très fortes (environ 1 mm par événement pluvieux) selon le COE-CHOSICA et les institutions chargées de ce SAP (l'ONG Soluciones Prácticas et le KOICA). C'est pourquoi ces mesures sont estimées utiles pour alerter la population des quartiers et le personnel du COE-CHOSICA quand de fortes pluies (avec des enregistrements de plus de 8 mm selon le SAP) se produisent dans une zone déterminée. En plus, le fait que les habitants eux-mêmes utilisent leurs propres pluviomètres les sensibilisent à la menace des laves torrentielles, ce qui peut leur faire prendre des attitudes plus responsables pour prévenir les catastrophes. Par ailleurs, afin de maintenir l'attention de la population (car les pluies se produisent rarement), le COE-CHOSICA rappelle l'intérêt de ces mesures avant la saison de pluies (à partir de décembre) au moyen d'ateliers et de rencontres avec les leaders des quartiers. Aujourd'hui (avril 2018), on ne sait pas combien de quartiers ont des pluviomètres de ce type ; cependant, probablement, il sera possible d'avoir les enregistrements de cette source dans les années à venir, car il a été établi que l'information récupérée au niveau de chaque pluviomètre artisanal sera partagée avec le COE-CHOSICA (communication personnelle le 23 février 2018, du chef du COE-CHOSICA, Monsieur José Martinez).



Figure 16. Pluviomètre artisanal fabriqué avec des objets courants promu par le COE-CHOSICA

SOURCE : Élaboration personnelle, 2018

b. Produit PISCO, résultat du traitement d'information satellitaire de précipitation et d'enregistrements de pluviomètres

En 2013, au moyen du traitement d'information satellitaire de précipitation et d'enregistrements de pluviomètres, le SENAMHI a créé le produit appelé PISCO (*Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations* : traduit par « Données interpolées du Pérou des stations climatologiques et hydrologiques du SENAMHI »), qui permet d'obtenir des données de précipitation en tout point, au niveau national (Lavado *et al.*, 2015).

L'information satellitaire de précipitation est issue du produit CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*: traduit par « Précipitation Infrarouge du Groupe des Aléas Climatiques avec des Données de Stations »)¹¹, qui provient du « Groupe des Aléas Climatiques » de l'Université de Californie à Santa Barbara (États-Unis). Ce produit grillé mensuel possède une résolution spatiale de 0,05°, comporte des enregistrements depuis janvier 1981, et est utilisé par divers groupes de chercheurs en hydro-climatologie au niveau mondial. Les enregistrements par les pluviomètres proviennent du réseau national du SENAMHI ; ils sont récupérés aussi depuis janvier 1981

¹¹ La base de données CHIRPS comporte des estimations de précipitations fondées sur des observations infrarouge de la *cold Cloud Duration – CCD* (traduit par « persistance des nuages froids »). Les précipitations sont estimées après l'interpolation des données de température des nuages qui sont calculées grâce à des enregistrements de radiations infrarouges (IR). Par exemple, si l'enregistrement des IR est faible, cela signifie que le satellite a capté des IR provenant de nuages hauts et froids qui pourraient produire des précipitations fortes ; au contraire, si l'enregistrement des IR est fort, le satellite a capté des IR provenant probablement la superficie de la terre, ce qui indique qu'il n'y a pas de nuages, ni de précipitations. Finalement, ces données sont corrigées avec des observations de pluies de stations pluviométriques (Funk *et al.*, 2015).

(évolution de la quantité de pluviomètres entre 1981 et 2013 : de 180 à 480 de manière progressive), après avoir été soumis à un contrôle de qualité. Le produit PISCO a été obtenu après combinaison de ces deux bases de données, en utilisant la technique géostatistique de « krigage avec dérive externe », technique robuste et relativement simple à utiliser (Ibid).

Grâce à ce produit qui a connu quelques améliorations depuis sa création, il est possible d'obtenir la précipitation journalière d'un point spécifique au niveau national depuis le 01 janvier 1981 avec une résolution de 5 km. Cette information est publique, disponible sur la page web du SENAMHI (communication personnelle le 26 février 2018, d'une spécialiste de la sous-direction d'Études et de Recherches Hydrologiques du SENAMHI, Madame Sofía Endara).

c. Radar météorologique

En janvier de 2018, l'Institut de Géophysique du Pérou – IGP a loué un radar météorologique de l'université d'Oklahoma (États-Unis) ; il a été installé sur la colline Suche, du district de Santiago de Tuna (province de Huarochirí, à environ 20 km au sud-est de la ville de Chosica), à une altitude de 2910 m (IGP, 2018b).

Grâce à cet instrument, il est possible d'enregistrer la quantité de pluie de manière ponctuelle avec une grande précision dans un rayon de 50 km. En plus, il peut enregistrer la quantité de pluie à diverses altitudes au moyen d'angles d'élévation, c'est-à-dire pas uniquement la quantité qui tombe dans la région étudiée, mais aussi la quantité d'eau stockée dans les nuages. Précisément, l'IGP l'utilise pour surveiller les pluies qui tombent dans le secteur choisi (qui inclut pratiquement tout le district de Lurigancho-Chosica) avec l'objectif de faire un modèle de pluie, dont les résultats seront comparés avec les enregistrements de pluies du SENAMHI (tout en sachant d'avance que ceux du radar sont plus précis et complets dans l'espace). De cette manière, l'étude des aléas produits par les pluies seront bien mieux compris (communication personnelle le 20 février 2018, du directeur de la sous-direction de Sciences de la Terre Solide de l'Institut de Géophysique du Pérou - IGP, Monsieur Juan Gomez).

Comme ce radar météorologique a été loué, il a fonctionné seulement du 1er janvier au 30 mars 2018. Pendant les mois suivants, l'information récupérée sera traitée, de telle sorte qu'en juillet 2018, les résultats seront publiés. L'idée de l'IGP est de convaincre le gouvernement que cet instrument est très utile pour étudier les aléas produits par les précipitations (laves torrentielles et inondations), et, que cela vaut la peine d'en acheter un, qui bénéficiera d'une maintenance constante de la part du groupe technique de l'IGP, car pendant le premier trimestre de 2018, ils ont été formés pour le faire efficacement (Ibid).

2.2.2. Traitement et comparaisons des données de précipitations

Certaines données de pluie manquent soit car elles sont très récentes (les enregistrements des pluviomètres artisanaux et les enregistrements fait par le radar de l'IGP, les deux à partir de 2018), soit parce qu'il y a des restrictions pour y accéder (les enregistrements de 2017 des pluviomètres de l'ONG Soluciones Prácticas et du KOICA¹²). C'est pourquoi, dans cette section, nous travaillons avec deux bases de données : les enregistrements des stations pluviométriques (pluies journalières de 16 stations entre 2012 et 2017 – figure 17) et les données du produit PISCO (pluies journalières entre 1981 et 2017), les deux fournies gentiment par le SENAMHI. L'analyse des données PISCO est faite dans trois régions : le bassin versant Rímac, le district de Lurigancho-Chosica et la ville de Chosica dans lesquelles les pluies sont intégrées spatialement (figure 17).

Les objectifs des traitements sont les suivants :

- Mieux connaître la répartition spatiale des pluies et de son cycle annuel dans la région d'étude à l'aide des données à long terme PISCO.
- Analyser le lien entre les pluies dans notre région et ENSO à l'aide de données PISCO.
- Comparer les données PISCO, dont l'avantage est un bon recouvrement spatial, aux données observées dans les stations pluviométriques.

¹² Selon les autorités de l'ONG Soluciones Prácticas au Pérou, il y a un accord établi entre cette institution et l'*Imperial College London* (Royaume-Uni) depuis la fin du 2017, afin que cette université fasse l'analyse de ces données.

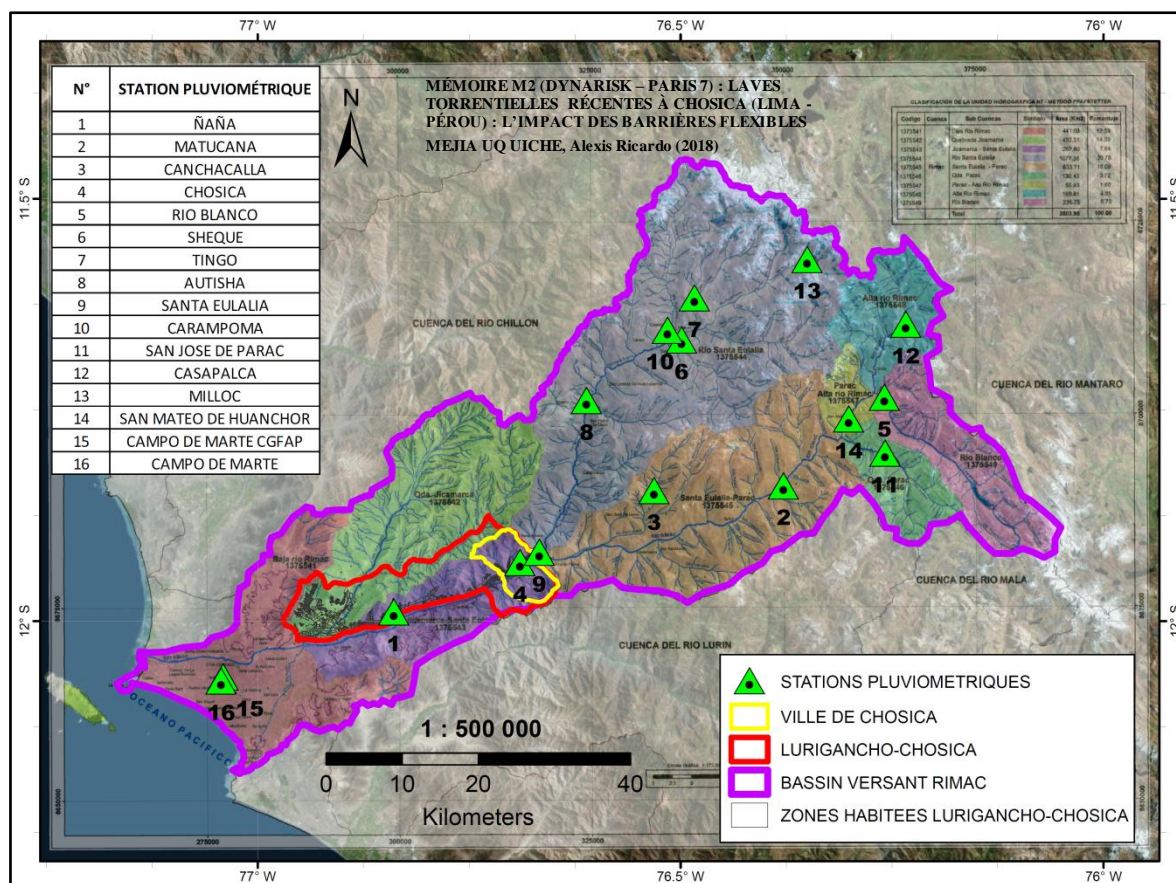


Figure 17. Le bassin versant de la rivière Rímac, le district de Lurigancho-Chosica et la ville de Chosica, ainsi que les stations pluviométriques du SENAMHI pour l'analyse des précipitations

SOURCE : SENAMHI, 2018a ; SENAMHI, 2018b ; ANA, 2010 ; INEI, 2007
Élaboration personnelle

a. Répartition spatiale des pluies annuelles dans les 3 régions définies (le bassin versant Rímac, le district de Lurigancho-Chosica et la ville de Chosica)

Les données PISCO, montrent que les précipitations annuelles pour les 3 régions définies ci-dessus (figure 18), diffèrent beaucoup en quantités. Les différences entre les quantités de pluie des trois régions sont liées au fait qu'elles circonscrivent des zones de conditions topographiques différentes qui affectent la production de la pluie. Le bassin versant du Rímac est plus pluvieux car il recouvre des zones de montagnes où des pluies fortes se produisent ; dans le cas de la ville de Chosica, la pluie est moindre parce qu'elle présente des zones plates proches de la côte et des zones de montagnes moins élevées que celles du bassin versant ; et la quantité de pluie dans le district est encore plus basse, dû à sa superficie qui comprend surtout des zones plates proches de la côte péruvienne, laquelle est caractérisée par ses pluies extrêmement faibles.

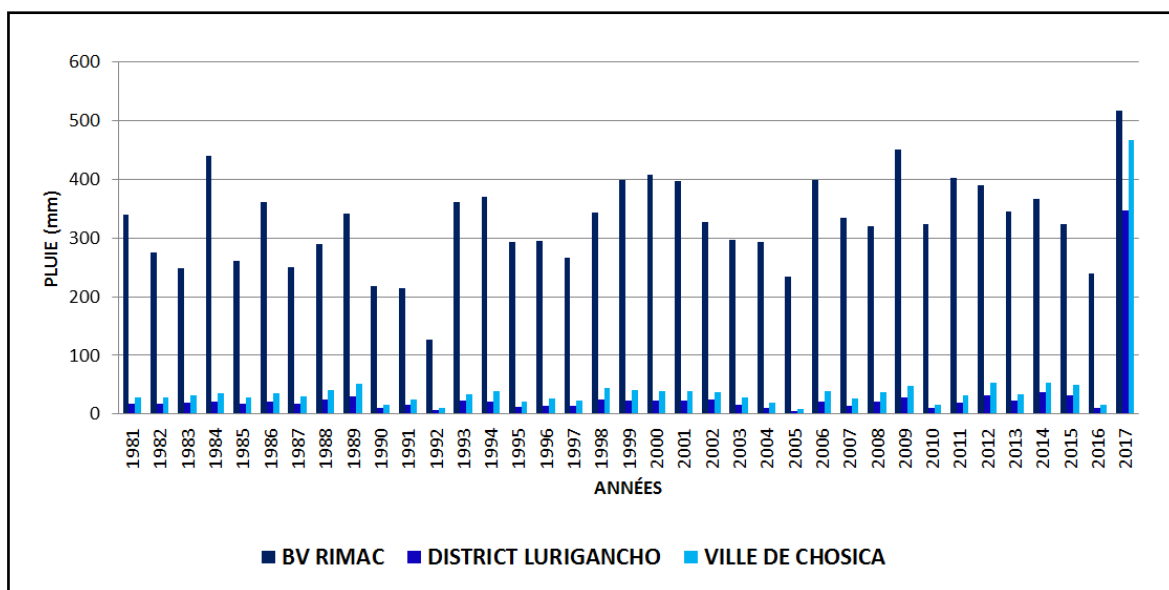


Figure 18. Précipitations annuelles par région (bassin versant de la rivière Rímac, district de Lurigancho-Chosica et ville de Chosica) selon les données du produit PISCO entre 1981 et 2017

SOURCE : SENAMHI, 2018b
Élaboration personnelle

Il est important de préciser qu'entre 1981 et 2016 les données du produit PISCO ont une résolution de 5 km, mais pour les enregistrements de 2017, la résolution est de 11 km seulement (auquel s'ajoute un défaut de contrôle de qualité), car au moment où les données ont été récupérées (mars 2018), elles étaient encore en cours de traitement (communication personnelle le 26 février 2018, d'une spécialiste de la sous-direction d'Études et de Recherches Hydrologiques du SENAMHI, Madame Sofía Endara). Ceci expliquerait la grande quantité de pluie enregistrée en 2017, principalement dans le district et la ville. Car, même si les précipitations de 2017 pour ces deux régions ont été réellement plus hautes que celles des années précédentes, elles ont peut-être été surestimées par le fait que la grille de 11 km de côté, supérieure à la grille de 5 km, inclut des zones de montagne où se produisent de fortes pluies. Dans ce cas, si on exclut les données de 2017 dans le calcul de la moyenne annuelle (1981-2016), elle est de 320,8 mm/an pour le BV Rímac, 19,4 mm/an pour le district Lurigancho-Chosica et 32,4 mm/an pour la ville de Chosica.

La figure 18 montre aussi qu'il pleut tous les ans à Chosica et à Lurigancho-Chosica, même si c'est de façon très minime, et pas seulement lors des années *El Niño*. De plus, ces pluies ne donnent pas de laves torrentielles tous les ans. Par exemple, en 2014, année

« normale » dans le Pacifique, il a plu autant qu'en 2015 (année *El Niño*) et il n'y a pas eu de lave torrentielle (alors qu'il y en a eu en 2015).

b. Cycle annuel des pluies pour les 3 régions définies (le bassin versant Rímac, le district de Lurigancho-Chosica et la ville de Chosica)

Les données mensuelles de pluie du produit PISCO, entre 1981 et 2016 (2017 est exclu à cause de la résolution différente des données), montrent que les enregistrements les plus forts se produisent en janvier, février et mars dans les 3 régions. Il est possible de le voir clairement dans la figure 19, qui présente le cycle annuel moyen pour les 3 régions (figure 19A) et les pourcentages pluviométriques dans le cycle annuel (figure 19B). En plus de confirmer les différences de quantité de précipitations entre les 3 régions (figure 19A), ces figures montrent que les pics ont lieu effectivement pendant l'été austral, mais pas exactement au même moment. Le maximum dans le bassin versant Rímac est en fin de saison des pluies (mars), alors que dans les deux autres régions il se produit en janvier.

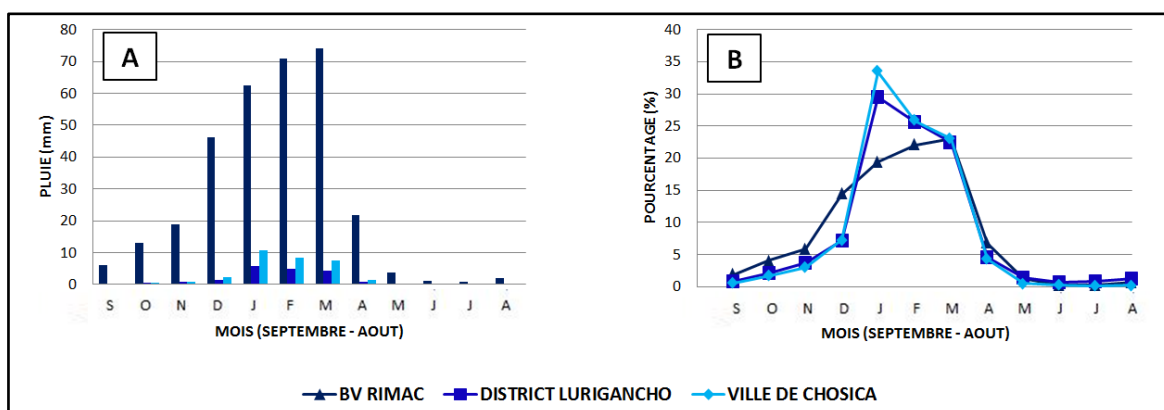


Figure 19. Cycle annuel des précipitations au niveau du bassin versant de la rivière Rímac, du district de Lurigancho-Chosica et de la ville de Chosica entre janv.-1981 et dec.-2016,

(A) en mm, (B) en pourcentage des pluies annuelles

SOURCE : SENAMHI, 2018b
Élaboration personnelle

c. Relation entre les pluies mensuelles pour les 3 régions définies (le bassin versant Rímac, le district de Lurigancho-Chosica et la ville de Chosica) et l'indice Niño 1+2

La figure 18 montrait que la quantité de pluie des années où se sont produits les *El Niño* forts (1982-1983 et 1997-1998) et *El Niño Costero* (2017) ne présentent pas une grande

différence par rapport à celle des autres années¹³, à l'exception de 2017, dont, comme nous l'avons dit précédemment, la quantité de pluie peut être attribuée à un manque de précision dans la résolution et à l'absence de contrôle de qualité.

Pour compléter ces observations une analyse plus fine des liens entre ENSO et pluie est faite à partir des données de précipitations mensuelles dans les 3 régions et des valeurs mensuelles de l'indice Niño 1+2 (indice qui mesure la TSO dans une région de l'est du Pacifique Equatorial - figure 13-, la plus proche de la région d'étude). Pour cela, nous avons récupéré la TSO mensuelle de la région Niño 1+2 entre 1981 et 2016 d'ESRL-NOAA (2018), et pour chaque mois de ces années, nous avons obtenu l'indice (I) à travers de la formule suivante :

$$I = \frac{X - \bar{X}}{\sigma}$$

Où : X = TSO de la région Niño 1+2 pour chaque mois ; \bar{X} = Moyenne des valeurs X ; σ = Écart type des valeurs X

La relation entre les valeurs mensuelles de l'indice Niño 1+2 et la quantité de pluie (mm) pour chacune des 3 régions (le bassin versant Rímac – BV Rímac, le district de Lurigancho-Chosica et la ville de Chosica) est montrée dans la figure 20. La droite de régression de ces figures présentent des corrélations significatives entre ces deux variables dans les 3 cas, un peu plus forte dans le BV Rímac ($R^2 = 0,2874$) qu'à Lurigancho et Chosica ($R^2 = 0,226$ et $R^2 = 0,227$, respectivement). Malgré leur significativité (les valeurs de R sont très supérieures au R_{seuil} selon le test de Bravais-Pearson¹⁴), visuellement nous pouvons comprendre que la relation n'est pas très bonne ; en effet on voit par exemple qu'aux valeurs positives de l'indice peuvent correspondre des précipitations extrêmement variables, de nulles à très fortes.

¹³ Cette situation est due au fait que les effets d'*El Niño* sont surtout observés dans le nord du Pérou, et peu dans le centre où nos 3 régions se localisent (cf. figure 12, Lavado et Espinoza, 2014)

¹⁴ Nous avons 432 données (quantité de mois entre 1981 et 2016) dans chaque cas, qui ont des valeurs de R suivantes : $R_{\text{BVRímac}} = 0,536$; $R_{\text{Lurigancho}} = 0,475$; $R_{\text{Chosica}} = 0,476$. Toutes sont supérieures au R_{seuil} de Bravais-Pearson, qui pour un degré de liberté de 400, voisin de notre effectif, est de 0,2185 pour un niveau de confiance de 0,00001.

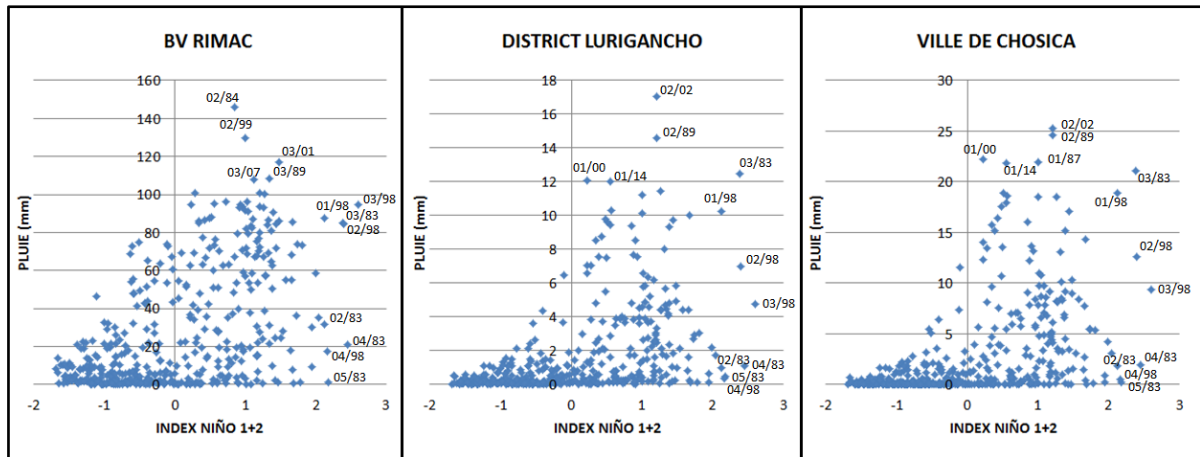


Figure 20. Relation entre les données mensuelles de l'indice Niño 1+2 et la quantité de pluie (mm) par région (bassin versant de la rivière Rímac, district de Lurigancho-Chosica et ville de Chosica) entre 1981 et 2016

SOURCE : ESRL-NOAA, 2018 ; SENAMHI, 2018b
Élaboration personnelle

Nous pouvons conclure qu'il y a une corrélation statistique entre les valeurs mensuelles (1981-2016) de l'indice Niño 1+2 (obtenues du ESRL-NOAA) et la quantité de pluie (PISCO) pour les 3 régions (bassin versant de la rivière Rímac, district de Lurigancho-Chosica et ville de Chosica). Cependant, ces corrélations n'indiquent pas l'existence d'un lien proportionnel entre les deux variables, ce qui ne permet donc pas d'estimer les pluies à partir de valeurs de l'indice Niño 1+2 ; elle permet simplement de dire que les pluies, et notamment les plus fortes, se produisent quand l'indice est positif, c'est-à-dire quand l'océan proche de la cote péruvienne a une température supérieure à la normale, ce qui est le cas le plus souvent en été. De plus, par exemple, dans le cas de la ville de Chosica (figure 20), les pluies les plus fortes se sont produites en févr.2002, févr.1989 et janv.2001, qui ont des indices Niño 1+2 positifs mais ne sont pas toujours des années *El Niño* ; et durant tous les mois d'été des *El Niño* forts de 1983 et 1998 (mars 1983, janv-févr-mars.1998), les pluies ont été importantes.

d. Comparaison entre les données PISCO et celles des stations pluviométriques

Dans cette section, nous comparons les précipitations journalières de la station de Chosica (station # 4 de la figure 17) entre 2012 et 2016 (période pendant laquelle des laves torrentielles sont observées à Chosica) et celle calculée par PISCO dans le pixel qui inclut Chosica (figure 21). Afin de profiter des données des 16 stations qui se localisent dans le

bassin versant de la rivière Rímac, nous faisons une comparaison entre les moyennes de ces données observées et celles des données PISCO correspondantes pour quelques régions du bassin versant du Rimac (Annexe 3).

Au premier abord, la figure 21 montre que pour les valeurs les plus fortes, les enregistrements de la station Chosica sont plus élevés que les données PISCO. Cependant, compte tenu des 1827 valeurs journalières entre 2012 et 2016, il n'y a pas de différence entre les enregistrements de PISCO et de ceux de la station ($P_{PISCO} = P_{STATION}$) dans 26,1 % des cas, celles de PISCO sont supérieures à celles de la station ($P_{PISCO} > P_{STATION}$) dans 71,8 % des cas et celles de PISCO sont inférieures à celles de la station ($P_{PISCO} < P_{STATION}$) dans 2,1 % des cas restant. En conséquence, la quantité totale de pluie entre 2012 et 2016 est plus élevée avec les données de PISCO qu'avec celles de la station Chosica (247,2 mm et 184,9 respectivement ; +33.7 %).

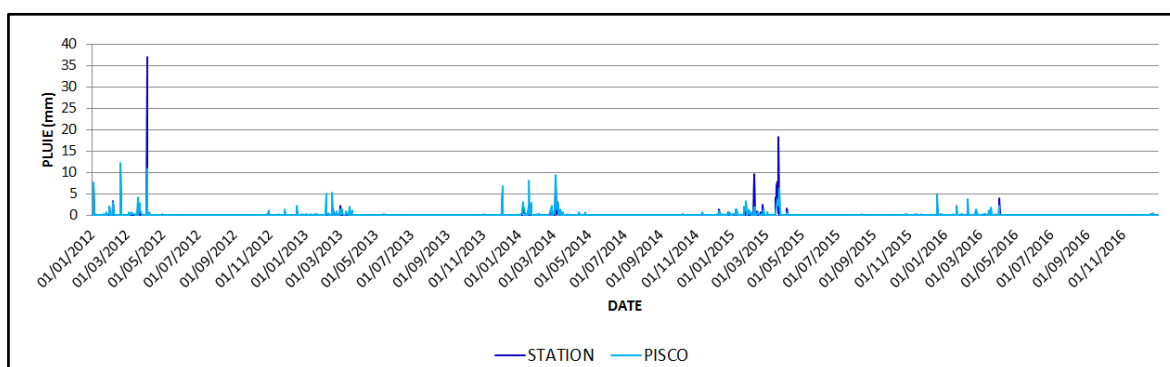


Figure 21. Précipitation journalière entre 2012-2016 pour la station Chosica avec les données des stations pluviométriques et celles du produit PISCO

SOURCE : SENAMHI, 2018a ; SENAMHI, 2018b
Élaboration personnelle

En conclusion, nous pouvons dire qu'en général, quand il y a des quantités de précipitations fortes, les enregistrements de la station Chosica sont plus élevés que les valeurs de PISCO, et les autres jours (où les précipitations sont faibles et moyennes), ceux de PISCO sont supérieurs. Ainsi, PISCO donne des précipitations presque tous les jours du premier trimestre de chaque année alors que ceci n'est pas observé, en réalité, par les habitants du quartier San Antonio – 2^{ème} zone (dans le torrent Pedregal à Chosica), qui disent dans leur témoignage sur les laves torrentielles qui se sont produites dans leur torrent en 2012 et 2015, que les pluies n'ont pas été aussi fréquentes que ce qu'indique le produit PISCO.

Compte tenu de ces résultats, nous pouvons donc dire que les enregistrements les plus conformes à la réalité pour la ville de Chosica sont les données de la station Chosica ; en effet, les données PISCO, compte tenu de leur résolution, sont très probablement affectées par les pluies des zones de montagne avoisinantes qui n'appartiennent pas à la zone d'étude, très aride habituellement. Cependant, grâce aux données du produit PISCO, nous avons obtenu une idée de la quantité de pluie par région (le bassin versant Rímac, le district de Lurigancho-Chosica et la ville de Chosica) et cela nous a permis de faire la corrélation avec l'indice El Niño 1+2, pour des régions où il y a peu d'information pluviométrique.

2.3. RELATION ENTRE LES PRECIPITATIONS, L'OCCURRENCE ET L'INTENSITE DES LAVES TORRENTIELLES

Comme il apparaît dans la section précédente que pour la ville de Chosica, les enregistrements des stations pluviométriques sont plus précis que ceux du produit PISCO, nous allons principalement analyser le lien entre les précipitations et l'intensité des laves torrentielles avec les enregistrements journaliers entre 2012 et 2017 de la station Chosica (station # 4 de la figure 17).

Il est important de souligner que 5 données journalières manquantes dans cette station coïncident avec des jours où des écoulements torrentiels se sont produits : toutes sont observées en 2017 (25/01/17, 27/02/17, 15/03/17, 16/03/17 et 17/03/17). Ceci est dû au fait que quelques stations (dont celle de Chosica) sont tombées en panne lors des très fortes pluies liées à *El Niño Costero* (communication personnelle le 26 février 2018, d'une spécialiste de la sous-direction d'Études et de Recherches Hydrologiques du SENAMHI, Madame Sofía Endara). Cependant, nous avons récupéré des données sur la page web du SENAMHI en mars 2017 dans le cadre de l'élaboration du document Mejía (2017). Elles ne sont maintenant plus publiées car incertaines ; cependant, faute de mieux, nous les utiliserons ici. En effet, même si ces données publiées sur le web n'ont pas été soumises à un contrôle de qualité (comme indiqué sur la page web), pour les autres dates de janvier-février-mars 2017 elles coïncident exactement avec les données de la base fournie par le SENMAHI ; c'est la raison pour laquelle, nous supposons que les valeurs des 5 dates de mars peuvent être utilisées.

Dans le tableau 7, nous présentons les écoulements torrentiels par date, les torrents déclenchés et l'intensité des flux, qui ont été montrés dans le sous-chapitre 1.3 (tableau 4), avec ici la quantité de pluie enregistrée par la station Chosica et pour le pixel PISCO le plus proche. Les valeurs de pluie diffèrent entre les deux bases de données ; la différence est minimale seulement dans quelques-uns des 19 cas (p.ex. la différence est inférieure à 1 mm pour 3 dates). Au total, les pluies enregistrées par Chosica sont supérieures à celles de PISCO (somme des pluies de ces 19 dates : $P_{\text{station}} = 166,9$ mm et $P_{\text{PISCO}} = 86,3$ mm). La raison en est que pour la plupart des dates où la station a enregistré des précipitations localement fortes, les données PISCO qui intègrent une surface plus grande (5 x 5 km) sont plus basses (p.ex. 05/04/12 : $P_{\text{station}} = 37,0$ mm, $P_{\text{PISCO}} = 10,8$ mm ; 16/03/17 : $P_{\text{station}} = 13,4$ mm, $P_{\text{PISCO}} = 9,9$ mm) ; puisque les données PISCO ne sont pas très représentatives de pluies locales très fortes, la description de ce tableau se va faire avec les données des pluies enregistrées par la station Chosica.

Donc, afin de décrire le tableau 7 avec les pluies enregistrées par la station Chosica, nous pouvons considérer les seuils de précipitations établis par l'ONG Soluciones Prácticas et KOICA, qui leur servent d'indicateur pour donner l'avis d'alerte dans le cadre du système d'alerte précoce (seuils de 3 mm et de 8 mm), afin de créer 4 groupes selon la quantité de pluie : 0 (sans enregistrement de pluie) ; jusqu'à 3 mm ($< 0 ; 3$ mm]) ; entre 3 mm et 8 mm (< 3 mm ; 8 mm]) ; et plus de 8 mm (> 8 mm). Ainsi, après avoir distribué les 19 dates d'écoulement torrentiel dans ces 4 groupes¹⁵, nous parvenons aux descriptions suivantes :

¹⁵ Écoulements torrentiels classifié selon leur intensité (fait dans le sous-chapitre 1.3) : écoulement hyper-concentré d'un volume de moyenne-petite taille – intensité = 1 ; écoulement hyper-concentré d'un volume de grande taille – intensité = 2 ; lave torrentielle à matrice boueuse – intensité = 3 ; lave torrentielle à matrice granulaire – intensité = 4.

Tableau 7. Date, quantité de pluie et intensité des écoulements torrentiels dans la ville de Chosica en 2012, 2015 et 2017

DATE	PLUIE (mm) STATION	PLUIE (mm) PISCO **	TORRENTS ET INTENSITÉ DES ÉCOULEMENTS TORRENTIELS								INT. GLOB 1/
			RIVE GAUCHE			RIVE DROITE					
			La Ronda	Mariscal Castilla	Santo Domingo	Corrales	Carossio	Libertad	Pedregal	Quirio	
05/04/12	37,0	10,8	4	4	2		4	4	2	2	22
09/02/15	9,5	1,9							3	3	6
20/03/15	7,0	2,3							2	2	4
21/03/15	7,9	3,7							2	2	4
23/03/15	18,3	3,2			2	4	4	2	3	3	18
15/01/17	5,0	13,9		1	2						3
16/01/17	6,5	6,0				1	1	1	1		4
20/01/17	0,0	2,0					2				2
21/01/17	8,0	4,8		2	2	2	2				8
23/01/17	2,0	2,3								1	1
25/01/17	19,5*	4,0	3	2	3	2	2	2	2	2	18
01/02/17	0,8	0,4	2						1	1	4
17/02/17	0,0	2,8							2		2
27/02/17	8,5*	0,6				2	2	2			6
01/03/17	0,0	4,0								1	1
02/03/17	0,5	2,9							2		2
15/03/17	10,0*	9,6				2	2	3	3	3	13
16/03/17	13,4*	9,9				2	2	3	4	4	15
17/03/17	13,0*	1,0							2	2	4

* Valeurs obtenues de la page web du SENAMHI qui n'ont été pas soumises à un contrôle de qualité

** Les données PISCO entre 1981 et 2016 ont une résolution spatiale de 5 km, mais pour les enregistrements de 2017, la résolution est de 11 km (auquel s'ajoute un défaut de contrôle de qualité), car au moment où les données ont été récupérées (mars 2018), elles étaient encore en cours de traitement

1/ Valeur d'intensité globale : Somme des valeurs de l'intensité de chaque déclenchement correspondant

SOURCE : SENAMHI, 2018a ; SENAMHI, 2018b ; SINPAD-INDECI, 2018 ; COE-CHOSICA, 2017 ; PREDES, 2015 ; Nuñez *et al.*, 2015 ; Guadalupe et Carrillo, 2012

Elaboration personnelle

- **Plus de 8 mm (> 8 mm) → 8 dates de déclenchements**

Dans ce groupe, il y a 8 dates de déclenchements d'écoulements torrentiels, parmi lesquelles 5 possèdent les intensités globales les plus fortes de notre enregistrement ($I_{05/04/12} = 22$ et 37 mm de pluie ; $I_{25/01/17} = 18 - 19,5$ mm ; $I_{23/03/15} = 18 - 18,3$ mm ; $I_{16/03/17} = 15 - 13,4$ mm ; $I_{15/03/17} = 13 - 10,0$ mm). Parmi les 3 autres dates restantes, celle qui attire l'attention est le 17/03/17, qui avec une précipitation de 13,4 mm (la 5^{ème} plus haute des 19 dates) a produit seulement une intensité globale de 4 (laves des torrents Pedregal et Quirio avec des intensités de 2). Ceci est dû au fait que ce jour-là, la quantité de matériel disponible pour le transport devait être moindre, car une grande partie avait déjà été déplacé les deux jours précédents lors d'événements d'intensités globales fortes ($I_{15/03/17} = 13$, $I_{16/03/17} = 15$). Il est

important de dire aussi que dans ce groupe, les 8 torrents de la zone d'étude se sont déclenchés avec des intensités comprises entre 2 et 4. C'est-à-dire que de manière générale, en observant ce groupe, nous pouvons dire que les précipitations fortes ont produit les intensités globales les plus importantes.

- **Entre 3 mm et 8 mm (< 3 mm ; 8 mm) → 5 dates de déclenchements**

Dans ce deuxième groupe, il y a 5 dates où des écoulements torrentiels se sont produits, qui ont eu des intensités globales par jour comprises entre 3 et 4, sauf le 21/01/17, où avec une précipitation de 8 mm, l'intensité globale a été de 8 (plus forte que quelques-unes des dates du groupe précédent). Dans ce cas, tous les torrents de la zone d'étude à l'exception du torrent La Ronda se sont déclenchés, mais avec des intensités comprises entre 1 et 2.

- **Entre 0 mm et 3 mm (< 0 mm ; 3 mm) → 3 dates de déclenchements**

Seulement 3 dates ont enregistré des écoulements torrentiels avec des intensités globales de 1, 4 et 2. Dans ce cas, il est notable que dans le jour avec l'intensité globale 1 (23/01/17) ait enregistré des pluies de 2 mm, alors que celui avec une intensité globale de 4 (01/02/17) s'est produit par une pluie de 0,8 mm. Les 3 torrents (La Ronda, Pedregal et Quirio) ont été déclenchés avec des intensités comprises entre 1 et 2.

- **0 mm (sans enregistrement de pluie) → 3 dates de déclenchements**

Il serait logique que dans ce groupe (absence de précipitation) aucun écoulement torrentiel ne se soit produit ; cependant, selon notre enregistrement, il y a 3 dates où ils se sont présentés : 2 avec des intensités de 2 (20/01/17 – torrent Carossio ; 17/02/17 – torrent Pedregal) et 1 avec une intensité de 1 (01/03/17 – torrent Quirio). Ces résultats montrent qu'effectivement les données de pluies ne sont pas tout à fait précises, qu'il peut exister des erreurs dans les enregistrements pour ces dates, ou probablement, dans le cas de ce dernier groupe (et aussi dans les autres), il y a eu des pluies focalisées seulement autour des parties hautes des torrents qui n'ont pas été mesurées par le pluviomètre de la station Chosica qui se localise dans le centre de la ville, mais qui apparaissent dans les pixels PISCO (2 mm le 20/01/17, 2,8 mm le 17/02/17 et 4 mm le 01/03/17).

En plus, dans deux cas (23/01/17 et 01/02/17), il y a eu des précipitations les jours précédents (22/01/17 – 0,5 mm ; 31/01/17 - 1 mm). Dans ce sens, nous pouvons dire que peut-être, les pluies de ces jours précédents ont aussi contribué au déclenchement des laves.

Afin de donner une information plus visuelle des données de pluie et de l'intensité globale des écoulements torrentiels par jour, nous présentons dans la figure 22 les valeurs journalières de ces deux variables entre janvier et avril (JFMA) pour les années 2012, 2015 et 2017. Grâce à cette figure, il est possible de dire que même s'il y a eu des pluies relativement fortes qui n'ont pas produit d'écoulements torrentiels (p.ex. 19/02/12 – 9,6 mm ; 23/02/15 – 2,5 mm ; 10/01/17 – 2,5 mm), il y a en général une relation positive entre la quantité de pluie et l'intensité globale, comme cela a été révélé aussi dans l'analyse par groupe de pluie, ci-dessus. De plus, la pluie totale à Chosica des 4 mois de janvier à avril a été de 62,6 mm, 61,2 mm et 107,3 mm pour 2012, 2015 et 2017, respectivement, ce qui laisserait attendre que les écoulements aient été plus élevés en 2017 ; mais selon l'analyse du tableau 5 du sous-chapitre 1.3, ces écoulements ont été moins forts en général que ceux des années précédentes, 2015 et 2012, sauf ceux des 15 et 16 mars 2017 qui ont été forts, mais pas autant que ceux du 23 mars 2015 ou du 05 avril 2012.

La figure 23 montre la relation entre pluies quotidiennes et intensité des laves torrentielles des 19 jours qui ont présenté des déclenchements. Cette figure 23 présente une bonne corrélation entre l'intensité globale et la pluie ($R^2 = 0,791$), et la droite de régression qui modélise ce lien montre qu'à chaque fois que la pluie augmente d'1 mm, l'intensité augmente de 0,6452, c'est-à-dire que l'intensité augmente d'1 point pour 1,55 mm de pluie supplémentaire. Cette relation toute théorique ne tient pas compte du fait que l'augmentation de l'intensité peut être liée soit à une intensification de la lave dans un torrent, soit au déclenchement d'un nouveau torrent.

Même s'il est clair que les résultats de la figure 23 sont une estimation assez grossière, il nous donne l'idée d'une relation directe entre les données de pluie de la station Chosica et les valeurs de notre classification d'intensité des écoulements torrentiels, qui sont moindres en 2017 que ceux de 2015 et 2012, comme il a été précisé précédemment.

Il est important de dire que cette relation pourrait être plus précise si on considérait d'autres facteurs qui influent l'intensité des laves torrentielles et des écoulements hyper-concentrés, comme les conditions géomorphologiques et les mesures structurelles pour réduire cette intensité, qui seront traitées dans le chapitre suivant.

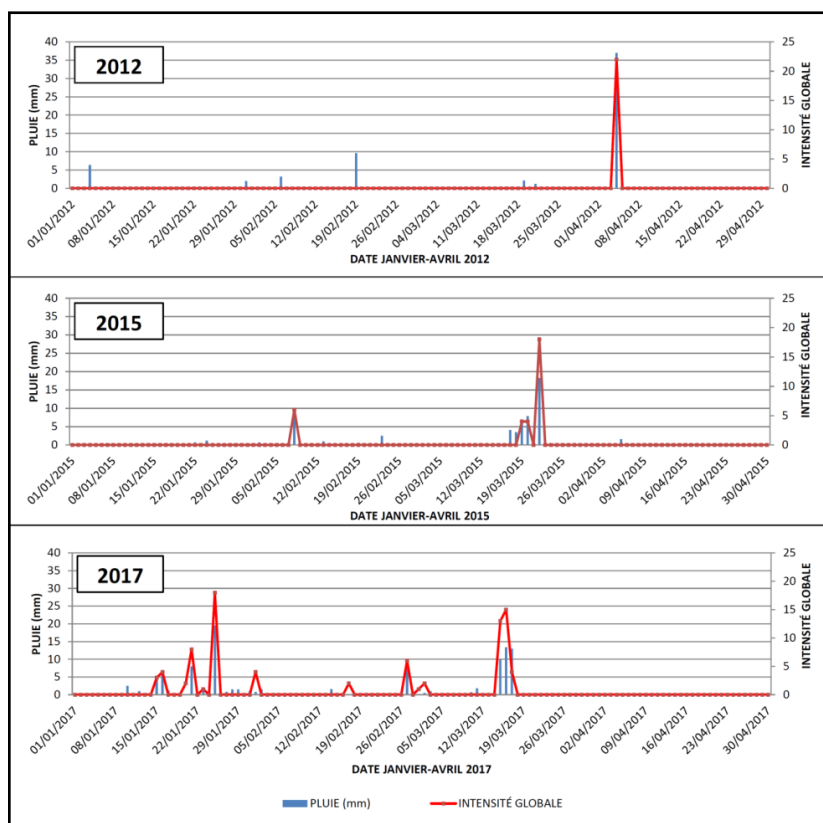


Figure 22. Quantité de précipitation et intensité globale des écoulements torrentiels par jour entre janvier et avril pour les années 2012, 2015 et 2017

SOURCE : SENAMHI, 2018a; SINPAD-INDECI, 2018 ; COE-CHOSICA, 2017 ; PREDES, 2015 ; Nuñez *et al.*, 2015 ; Guadalupe et Carrillo, 2012

Élaboration personnelle

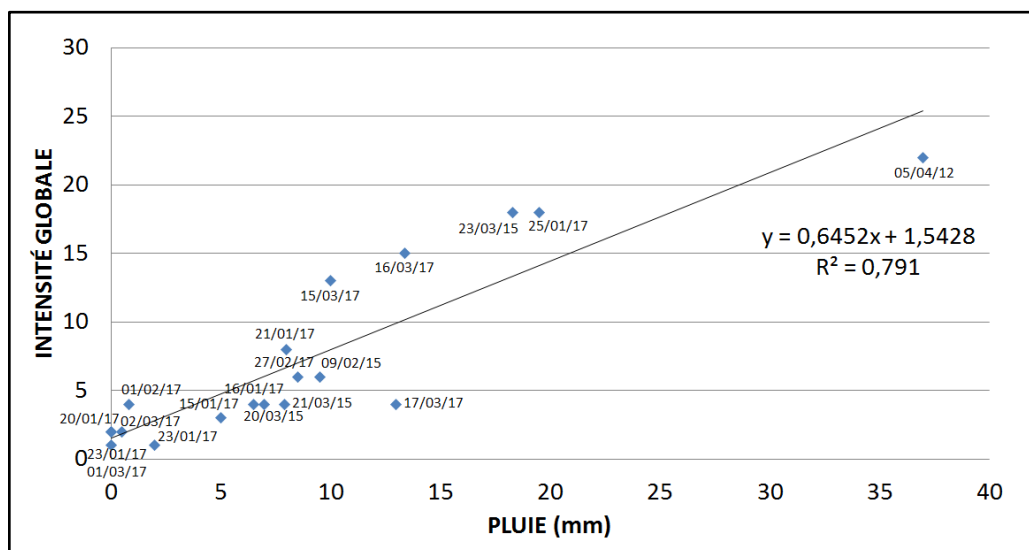


Figure 23. Modèle de régression linéaire entre l'intensité globale des écoulements torrentiels par jour et la quantité de pluie (mm) à la station de Chosica les jours de déclenchements entre 2012 et 2017

SOURCE : SENAMHI, 2018a; SINPAD-INDECI, 2018 ; COE-CHOSICA, 2017 ; PREDES, 2015 ; Nuñez *et al.*, 2015 ; Guadalupe et Carrillo, 2012

Élaboration personnelle

CHAPITRE III

IMPACT DES BARRIÈRES FLEXIBLES SUR LA RÉDUCTION DE L'INTENSITÉ DES LAVES TORRENTIELLES À CHOSICA

3.1. UNE NOUVELLE MESURE STRUCTURELLE FACE AUX LAVES TORRENTIELLES : LES BARRIÈRES FLEXIBLES

Parmi les mesures structurelles pour faire face aux laves torrentielles, les ouvrages les plus connus et utilisés, pour réduire leurs impacts et leurs dommages sont les suivants :

- les digues, faites de maçonnerie en pierre, qui dissipent l'énergie des laves torrentielles en retenant les blocs ;
- les murs, construits de pierre et de béton, qui canalisent les flux des torrents pour protéger les logements qui se trouvent aux côtés des lits des torrents ;
- et les tranchées, des sortes de canaux, qui ont pour but de conduire les eaux des affluents vers le lit des torrents.

Cependant, un nouveau type d'ouvrage appelé *flexible debris flow barrier* (traduit par « barrière flexible pour laves torrentielles ») a été développé entre 2005 et 2008 par le *Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft – WSL* (« Institut fédéral suisse de recherches sur la forêt, la neige et le paysage » en allemand) et la société suisse Geobruigg (Volkwein, 2014). Il s'agit d'un filet métallique de protection qui doit être installé dans la partie supérieure des bassins versants torrentiels, avec l'objectif de retenir partiellement le volume de matériaux transportés par les laves torrentielles, et d'éviter la chute de grands blocs dans les zones basses où se trouve normalement la population (ANA, 2015a).

Il est important de souligner que ce type d'ouvrage est une évolution d'une structure appelée *net barrier* (traduit par « barrière de filet »), qui est utilisée depuis les années 1950 pour retenir de gros rochers et de la neige dans le cadre de mesures de protection contre les avalanches. Cet ouvrage a été introduit pour la première fois dans la montagne Schafberg,

localisée dans la commune suisse de Pontresina en 1951, et par la suite, dans certaines zones où il y a un risque d'avalanche, comme dans la commune suisse de Fieberbrunn depuis 1964 (figure 24A). Ces cas ont fait partie de la phase de démarrage de la mise en place de cette structure, qui a été utilisée pour la première fois face aux laves torrentielles à Aobandani (Japon) en 1998, retenant environ 750 m³ de matériel (Wendeler, 2016) (figure 24B).

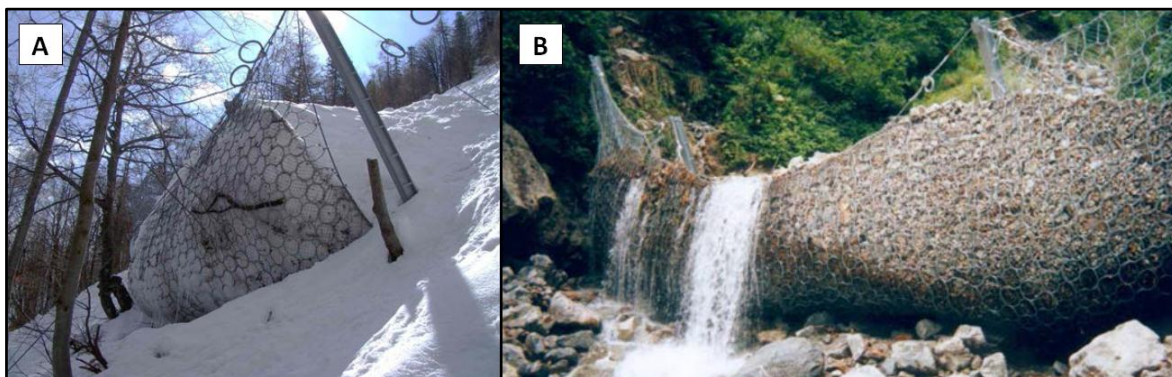


Figure 24. Barrières de filet conçues pour retenir de gros rochers et de la neige,
 (A) Barrière de filet utilisée pour retenir de la neige à Fieberbrunn (Suisse) - 1964
 (B) Barrière de filet utilisée pour retenir des laves torrentielles à Aobandani (Japon) - 1998

SOURCE : Wendeler, 2016

Cependant, en Oregon (États-Unis) en 1996, l'*United States Geological Survey* – USGS (traduit par « Institut d'études géologiques des États-Unis ») a fait des expériences pour la conception structurelle d'un filet destiné à faire face spécifiquement aux laves torrentielles. Après plusieurs essais pour trouver le système le plus efficace possible, les chercheurs ont créé un filet qui comprend, entre autres éléments, des câbles de support étirés d'une extrémité à l'autre de la structure, ce qui la rend moins rigide que la précédente. C'est pourquoi cette barrière formée d'un filet à anneaux métalliques est appelée *flexible barrier* (traduit par « barrière flexible »). Les recherches sur cette structure ont continué, de telle sorte qu'en 2005, le WSL a élaboré le premier modèle de barrière flexible d'échelle 1:1, qui a été installé dans le torrent Illgraben (Suisse) (figure 25), et est continuellement amélioré (Ibid).

La dénomination de cette structure (barrière flexible) est liée principalement à ses propriétés. D'un côté, ce système est conçu pour retenir des matériaux des laves torrentielles, dont, à la différence de la barrière de filet, la modélisation et la conception sont plus complexes car la barrière flexible doit pouvoir faire face à une charge à la fois

solide et liquide. Mais en plus de réaliser le travail de rétention, c'est une structure « flexible » avec une haute capacité de déformation, de telle sorte que face à la collision avec les laves torrentielles, la structure peut se déformer en produisant une dissipation de l'énergie de l'impact des flux ; de cette manière, le risque d'effondrement devient moindre (Ibid).



Figure 25. Premier modèle à échelle 1:1 d'une barrière flexible pour faire face aux laves torrentielles en 2005 dans le torrent Illgraben (Suisse)

SOURCE : Wendeler, 2016

Les pressions que la barrière flexible reçoit face à l'impact des laves torrentielles ont été évaluées, en distinguant 3 moments (figure 26) :

- L'impact initial (figure 26A) ; les premiers matériels solides sont retenus et le matériel liquide passe par les orifices du filet. A ce moment, la barrière reçoit une pression hydrostatique à cause du matériel retenu (p_{hyd}) et une pression hydrodynamique (Δp), dont les valeurs dépendent principalement de la hauteur du flux (h_{fl}) et du moment cinétique que celle-ci produit.
- Le processus de remplissage de la barrière (figure 26B) ; une partie du matériel solide est retenu et immobilisé, et une autre partie est au-dessus et en mouvement, le drainage du matériel liquide se faisant par les orifices du filet. Dans cette situation, la pression hydrostatique (p_{hyd}) dépend de la hauteur de tout le matériel retenu par la barrière (H), alors que la pression hydrodynamique (Δp) est liée à la hauteur de la partie qui est en mouvement (h_{fl}). La barrière se déforme et se gonfle dans la direction du flux grâce aux câbles de support ; le câble supérieur se déplace vers le bas pour aider le câble inférieur à pénétrer dans le lit du torrent, et ainsi, le protéger et éviter la sortie du matériel par le bas, sous la barrière.

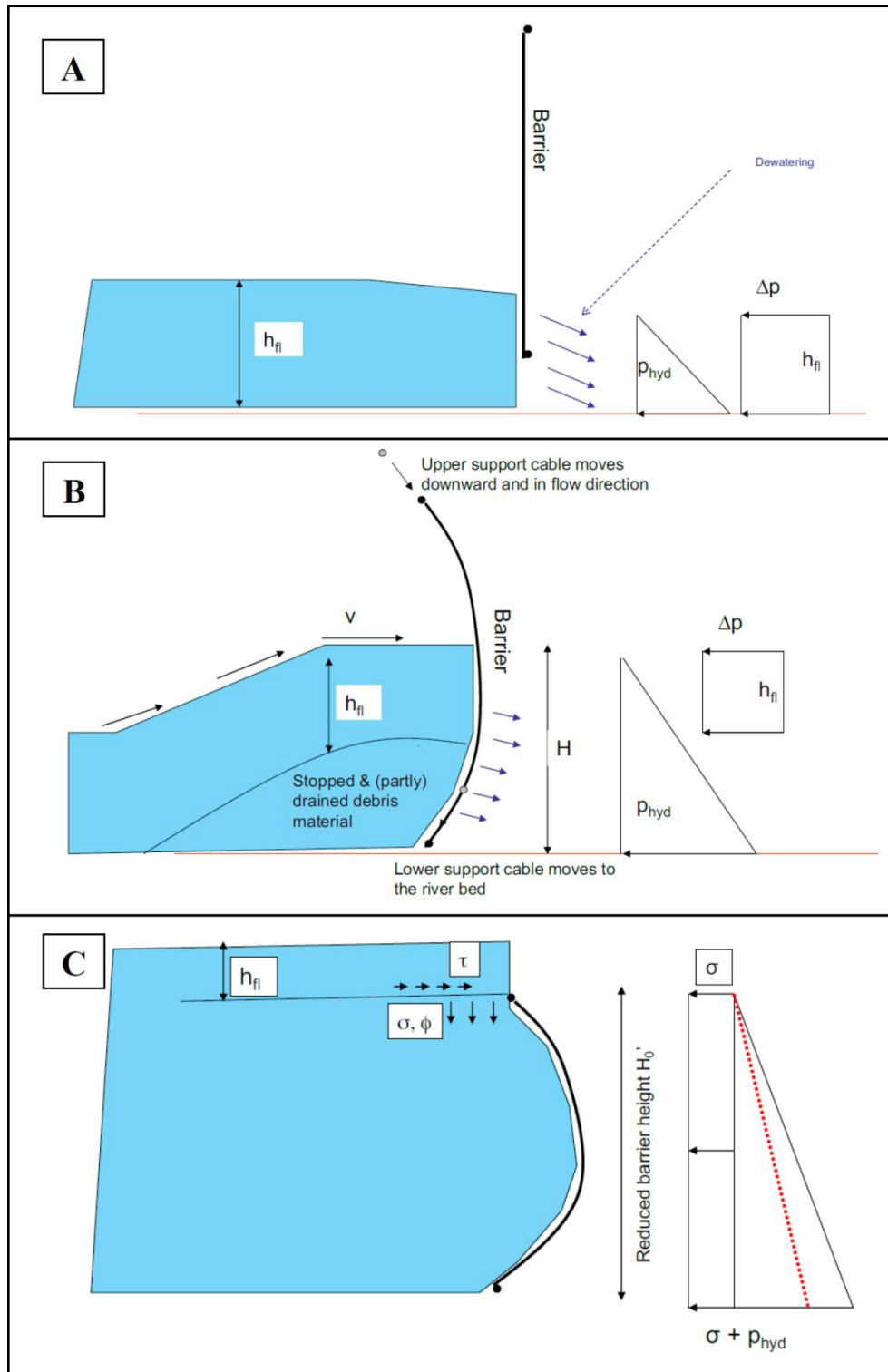


Figure 26. Types de pressions que la barrière flexible reçoit face à différents moments d'impact des laves torrentielles,

- (A) Pressions lors de l'impact d'initial
- (B) Pressions lors du processus de remplissage de la barrière
- (C) Pressions quand la barrière est remplie de matériel qui continue à se déplacer par-dessus

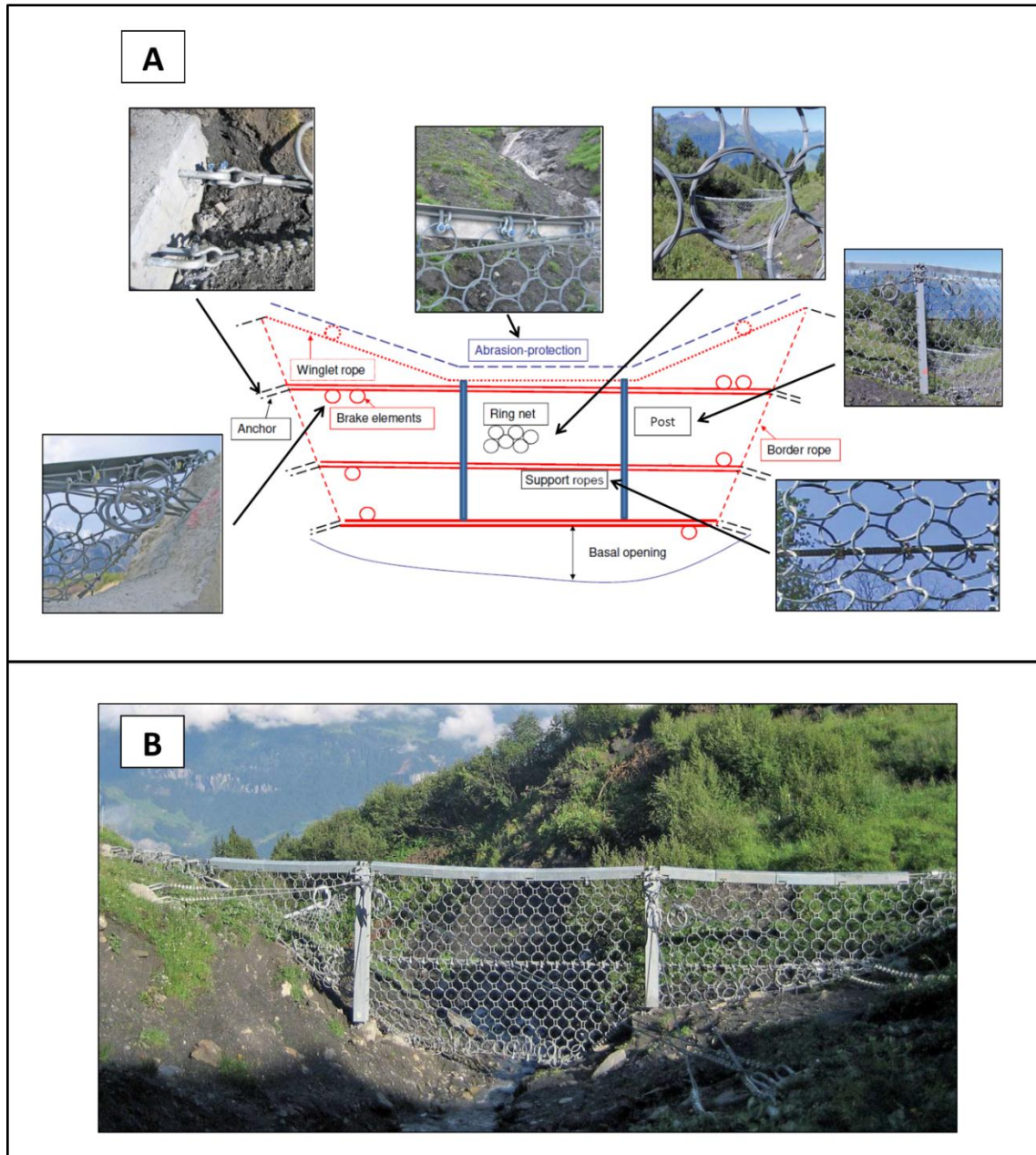
SOURCE: Volkwein, 2014

- La barrière est remplie de matériel qui continue à s'écouler par-dessus (figure 26C) ; à ce moment, la hauteur de la barrière est réduite (H_0) à cause du déplacement des câbles de support vers le lit du torrent, et il n'y a pas de pression hydrodynamique (Δp) sur la barrière, car tout le matériel retenu est immobile. Puisque une grande partie du matériel liquide est déjà drainé, le triangle de pressions est réduit (en pointillée dans la figure 26C) et la pression hydrostatique (p_{hyd}) est réduite. Cependant, il existe une autre pression produite par le matériel qui se déplace par-dessus (pression latérale de la terre). En considérant les paramètres de ce matériel (ϕ : angle de frottement ; σ = contrainte normale ; τ = contrainte tangentielle), sa pression est proportionnelle au σ . Donc, la barrière reçoit cette pression ainsi que la pression hydrostatique (Volkwein, 2014).

Par conséquent, la conception de la barrière flexible a été précisément élaborée afin que la structure accomplisse ces deux tâches (retenir le matériel des laves torrentielles et réduire l'impact du flux grâce à sa déformation) et qu'elle soit préparée pour faire face aux différents types de pressions. Pour ces raisons, la barrière flexible comprend les éléments suivants (figure 27) :

- *Ring net* (traduit par « filet à anneaux ») : Cet élément est le premier qui reçoit l'impact des laves torrentielles. Il doit avoir la capacité élastique pour absorber une partie de l'énergie de l'impact, et réduire aussi les forces qui sont transmises vers les ancrages (*anchors*). Afin qu'ils permettent de ne laisser passer que de petites particules et de l'eau, les anneaux formés par des fils d'acier de 3 mm qui présentent entre 7 et 19 enroulements, ont un diamètre compris entre 30 et 35 cm.
- *Support ropes* (traduit par « câbles de support ») : Ces câbles métalliques ont un diamètre de 22 mm, et sont étirés d'une extrémité à l'autre de la barrière. Ils transmettent la charge que reçoit le filet à anneaux aux ancrages (*anchors*). Selon l'importance de la charge, la quantité de câbles nécessaire peut varier, mais ils doivent être également distribués le long de la barrière.
- *Winglet and border ropes* (traduit par « câble transversal et câbles latéraux ») : Le câble transversal est fixé dans l'ancrage supérieur d'une extrémité de la barrière, il se prolonge ensuite de manière parallèle aux câbles de support, et il remonte afin d'être fixé dans l'ancrage supérieur de l'autre extrémité. Son objectif est que la force du flux de la lave torrentielle se concentre vers le centre de la barrière, afin de

réduire l'érosion des berges. Les câbles latéraux sont étirés parallèlement aux berges et y sont ancrés à intervalles régulier. Tous ces câbles métalliques (qui ont des dimensions similaires à celles des câbles de support) sont les bornes du filet à anneaux.



SOURCE: Sur la base de données de Wendeler, 2016 ; Geobruigg, 2018a

- *Abrasion protection* (traduit par « protection contre l'abrasion ») : Ce système a le but de protéger le câble transversal de l'effet abrasif que produit l'impact des blocs (protection contre le cisaillement). Après plusieurs expériences, il est apparu que cet élément est très susceptible d'être endommagée, et que la meilleure option est qu'il soit constitué d'un profilé d'angle d'acier qui couvre le câble transversal, et qui est changé si nécessaire.
- *Brake elements* (traduit par « anneaux de freinage ») : Ces éléments sont des tubes plastiques de forme circulaire, dans lesquels passent les câbles de support et les câbles latéraux. Quand ces câbles reçoivent des charges, ils s'étirent et les tronçons qui se trouvent à l'intérieur de ces éléments de freinage réduisent le diamètre du cercle de l'anneau, de telle sorte que ces tubes plastiques, par leur déformation, se contractent et absorbent l'énergie de l'impact.
- *Anchors* (traduit par « ancrages ») : Ces composants d'aciers sont fixés à différents intervalles de chaque berge, et reçoivent la charge transmise par le filet à anneaux. Ils sont composés d'une tête flexible d'acier à une extrémité (où sont fixés les câbles de support) et d'une pointe d'acier à l'autre extrémité, qui adhère à la roche de la berge. En fonction du type de roche de la berge et de sa résistance à l'érosion, la profondeur et la technique de fixation peuvent varier.
- *Posts* (traduit par « support ») : Quand la barrière est très longue, il est nécessaire d'installer des supports avec des fondations ancrées dans le terrain qui soutiennent tout le système de câbles et le filet à anneaux (Wendeler, 2016).

Avant de définir toutes les dimensions de chaque élément afin que le système soit le plus efficace possible, la réponse de la structure entière face aux différentes pressions produites par les laves torrentielles est modélisée par des logiciels appelés FARO and CARAT, basés sur la méthode d'éléments finis (figure 28). Le processus pour déduire quelles sont les spécifications techniques de la structure qui doit être utilisée commence en général par la modélisation des différentes pressions produites par les laves torrentielles, en considérant quelques paramètres du flux (la vitesse, la hauteur, la densité, le coefficient de frottement du matériel, entre autres). Ensuite, il s'agit de tester la réponse à cette pression d'une barrière flexible dotée d'éléments de certaines tailles ; jusqu'à trouver les dimensions les plus appropriées de cette structure compte tenu du cas traité (Volkwein, 2014).

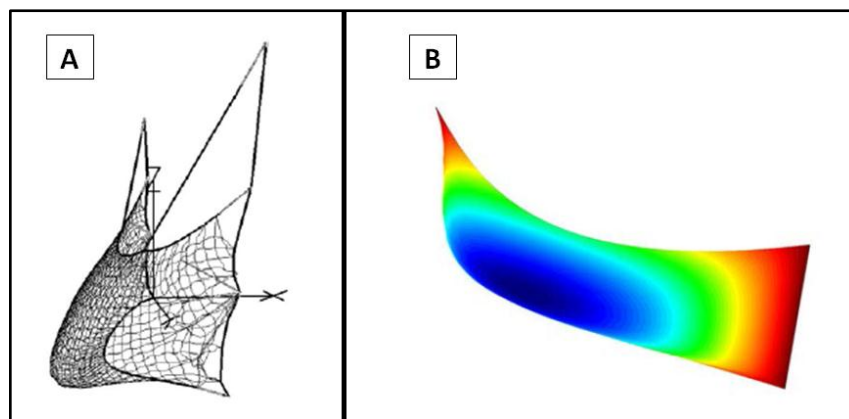


Figure 28. Modélisation des barrières flexibles face aux pressions produites par des laves torrentielles,

(A) Avec le logiciel FARO : Scénario final d'une barrière flexible après l'impact d'une lave torrentielle

(B) Avec le logiciel CARAT : Comportement des déformations dans une barrière flexible face à l'impact d'une lave torrentielle (bleu : déformation plus importante ; rouge : déformation moins importante)

SOURCE: Wendeler, 2016

Une fois que les dimensions de la barrière flexible sont précisées grâce à la modélisation, des essais sont réalisés en laboratoire avec des modèles à échelle réduite, tant pour la barrière que pour la lave torrentielle (figure 29). Finalement, après quelques ajustements dans le système, il est possible d'avoir des barrières avec des dimensions adaptées pour résister à un certain type d'impact (Wendeler, 2016).

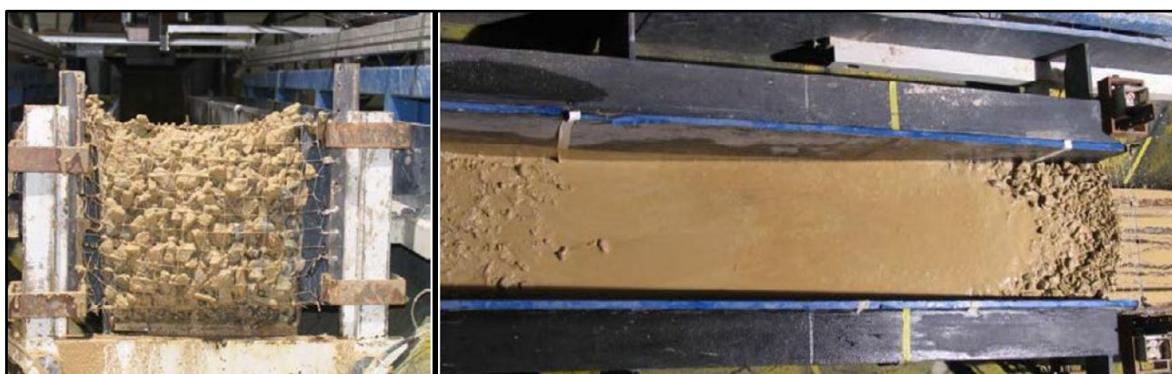


Figure 29. Vue frontale et vue d'en haut d'un essai de laboratoire dans le cadre de l'évaluation du comportement d'une barrière flexible,

Essai avec plusieurs types de barrières flexibles à échelle réduite, avec du matériel du torrent Illgraben (Suisse) sur une plate-forme avec une inclinaison de 25 %

SOURCE: Wendeler, 2016

De cette manière, la société suisse Geobrugg (qui avec le WSL ont travaillé dans le projet de conception et d'étude de ces barrières) commercialise actuellement (avril 2018) 10

types de barrières flexibles (qui varient selon les conditions spécifiques de la zone où elles seront mises en place). Le tableau 8 montre quelques spécifications techniques :

Tableau 8. Quelques spécifications techniques des barrières flexibles fabriquées par Geobruigg (en avril 2018)

TYPE DE BARRIÈRE	SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES				
	HAUTEUR (m)	LONGUEUR SUPÉRIEURE APROX. (m)	PROFIL DE SUPPORTS INTERMÉDIAIRES (HEB 1/)	TYPE DE FILET À ANNEAUX (ROCCO a/b/c 2/)	PRESSIION D'IMPACT DES LAVES TORRENTIELLES (kN/m ²)
VX060L-H4	4,0	10,0	-	ROCCO 7/3/300	60,0
VX080-H4	4,0	15,0	-	ROCCO 12/3/300	80,0
VX140-H4	4,0	15,0	-	ROCCO 16/3/300	140,0
VX100-H6	6,0	15,0	-	ROCCO 16/3/300	100,0
VX160-H6	6,0	15,0	-	ROCCO 7/3/300	160,0
UX060L-H4	4,0	25,0	HEB-160	ROCCO 12/3/300	60,0
UX100-H4	4,0	25,0	HEB-200	ROCCO 12/3/300	100,0
UX160-H4	4,0	25,0	HEB-220	ROCCO 16/3/300	160,0
UX120-H6	6,0	24,0	HEB-240	ROCCO 16/3/300	120,0
UX180-H6	6,0	24,0	HEB-260	ROCCO 16/3/300	180,0

1/ Structure avec une section transversale en forme de H. La hauteur de cette section (en mm) est représentée par le chiffre qui accompagne le nom HEB

2/ Le fils d'acier ROCCO est fait d'un alliage composé de zinc et d'aluminium (95 % et 5 % respectivement). Dans ce cas, a / b / c représentent respectivement : # enroulements / diamètre du fils d'acier / diamètre de l'anneau

SOURCE : Geobruigg, 2018b ; Geobruigg, 2018c

Élaboration personnelle

Comme nous l'avons déjà indiqué plus tôt, cette barrière a été testée à échelle réelle (1:1) pour la première fois en 2005 dans le torrent Illbarren (Suisse), où les recherches ont continué. Cependant, au cours des années suivantes, elles ont été installées dans d'autres torrents (p. ex. dans quelques torrents suisses : Grönbach, Hüpbach, Milibach, Merdenson) avec des résultats très positifs. Dans ces cas, après l'arrivée des laves torrentielles, les barrières flexibles n'ont pas été affectées gravement, ni leurs ancrages, ni les autres éléments, et elles ont retenu de grands volumes de matériel. Cette situation a permis que de grands blocs n'arrivent pas dans les parties en aval (où se trouvent principalement la population et les enjeux économiques), réduisant ainsi les dommages qui existaient auparavant (dommages à la population située à l'aval, aux routes, aux zones de cultures, entre autres) (Volkwein, 2014).

3.2. DESCRIPTION DES BARRIÈRES FLEXIBLES À CHOSICA

Compte tenu des conséquences des laves torrentielles de 2015, non seulement à Chosica mais aussi dans d'autres localités du Pérou, et compte tenu de la prévision qu'avait fait le Comité multisectoriel chargé de l'Étude Nationale du Phénomène *El Niño* – ENFEN en disant qu'il y aurait un *El Niño* l'année suivante, en 2016 (qui devrait produire de fortes pluies, et en conséquence, des laves torrentielles), le gouvernement central du Pérou a promulgué un décret d'urgence pour réaliser des actions immédiates dans quelques torrents, à l'échelle nationale. Comme l'Autorité Nationale de l'Eau du Pérou – ANA (organisme spécialité du Ministère d'Agriculture du Pérou - MINAGRI) est l'entité du gouvernement central chargée des études et des actions en matière de ressources hydriques à l'échelle nationale, elle a été nommée responsable de l'exécution de cet ordre. Face à cette situation, diverses entreprises ont présenté des projets au Ministre du MINAGRI (autorité suprême de ce ministère et de l'ANA) qui puissent être exécutées rapidement. Finalement, le Ministre et ses conseillers, avec l'avis technique de l'ANA, ont choisi la mise en place de barrières flexibles telles que celles décrites dans la section précédente (communication personnelle le 12 février 2018, d'un spécialiste de la Direction de Planification et Développement de Ressources Hydriques de l'ANA, Monsieur Juan Rodriguez).

Dans ce contexte, en octobre 2015, l'ANA a présenté un projet appelé *Actividades de limpieza y protección en quebradas por peligro inminente de inundaciones y huaycos en los departamentos de Lima, Piura, Tumbes, Lambayeque, La Libertad, Cajamarca y Cusco* (« Activités de nettoyage et protection dans les torrents face à la menace imminente d'inondation et de laves torrentielles dans les départements de Lima, Piura, Tumbes, Lambayeque, La Libertad, Cajamarca y Cusco », en espagnol), dans lequel, en plus des travaux de nettoyage, apparaît l'installation de barrières flexibles de Geobrug, que le projet a appelé *Barreras Dinámicas* (« Barrières Dynamiques », en espagnol) (ANA, 2015a).

Dans le cadre de ce projet, l'ANA a élaboré des fiches techniques avec des informations sur chaque torrent où une intervention était prévue (conditions géographiques et informations sur les laves torrentielles passées), ces données étant la base des décisions relatives aux types et nombres de barrières à installer. Au total, selon le projet, 36 barrières

flexibles devaient être installées sur 14 torrents de 4 régions du Pérou (Lima, Piura, La Libertad et Cusco), Lima étant la région avec le plus grand nombre (22). Dans la région de Lima, 21 ont été destinés au district de Lurigancho-Chosica (sur les 8 torrents de notre zone d'étude) et 1 au district de Chaclacayo (Ibid) (tableau 9).

Tableau 9. Barrières flexibles devant être installées à la fin de 2015

REGION	PROVINCE	DISTRICT	TORRENT	# BARRIÈRES	TOTAL BARRIÈRES
LIMA	LIMA	LURIGANCHO-CHOSICA	PEDREGAL	4	22
			MARISCAL CASTILLA	3	
			CORRALES	2	
			CAROSSIO	4	
			LA LIBERTAD	2	
			QUIRIO	2	
			SANTO DOMINGO	2	
		LA RONDA	2		
		CHACLACAYO	HUAMPANI	1	
PIURA	MORROPON	SAN JUAN DE BIGOTE	BIGOTE	2	2
LA LIBERTAD	TRUJILLO	EL PORVENIR	SAN IDELFONSO	3	10
		LA ESPERANZA	DE LEON	4	
		LAREDO	SAN CARLOS	3	
CUSCO	CALCA	PISAC	TUCSAN	2	2
TOTAL BARRIÈRES FLEXIBLES AU PEROU DEVANT ÊTRE INSTALLÉES À LA FIN DU 2015				36	

SOURCE : ANA, 2015a
Élaboration personnelle

Dans le cas de Lima, l'ANA a signé un contrat le 13 décembre 2015 avec l'entreprise espagnole *Tecnología de los Materiales S.A – TDM* (partenaire de Geobrugg), dans lequel l'ANA engage les services de TDM pour l'acquisition et l'installation de 22 barrières flexibles dans les 2 et 3 mois. Ce projet a coûté environ 21,5 millions de *nuevos soles*¹⁶, c'est-à-dire, environ 6,5 millions de dollars (ANA, 2015b). Le tableau 10 présente le nombre de barrières flexibles par torrent (# barrière et position de la barrière vers l'amont ou vers l'aval - M1 : barrière la plus à l'amont), les types de barrières (dont les spécifications techniques apparaissent dans le tableau 8), leurs dimensions réelles, ainsi que le coût total (acquisition et installation) pour chaque torrent.

¹⁶ Le *Nuevo Sol* (S/.) est la monnaie nationale du Pérou ; 1 US\$ = S/. 3,2231, en 16 avril 2018 - (extrait de la Banque centrale de réserve du Pérou, 2018)

Tableau 10. Information sur les barrières flexibles installées à Lima à la fin de 2015

N°	TORRENT	INFORMATION DES BARRIÈRES 1/			DIMENSIONS DES BARRIÈRES 1/				COÛT (S./) 2/
		N° BAR.	N° BAR. EN TORRENT a/	TYPE DE BAR. b/	LONGUEUR SUPERIEURE (m)	LONGUEUR INFERIEURE (m)	HAUTEUR APROX (m)	SURFACE APROX (m ²)	
1	PEDREGAL	2	M1	UX120-H6	23,5	10,2	6,0	101,1	2 623 800,00
		1	M2	VX140-H4	13,4	7,9	4,0	42,5	
		3	M3	UX180-H6	30,5	20,0	6,0	151,5	
		4	M4	UX180-H6	27,3	16,7	6,0	131,9	
2	MARISCAL CASTILLA	5	M1	UX100-H4	18,0	8,3	4,0	52,6	1 984 635,00
		6	M2	UX100-H4	20,4	10,4	4,0	61,6	
		7	M3	UX100-H4	17,3	9,3	4,0	53,1	
3	CORRALES	8	M1	UX100-H4	28,1	18,2	4,0	92,6	1 429 100,00
		9	M2	UX180-H6	25,4	13,4	6,0	116,4	
4	CAROSSIO	10	M1	UX180-H6	54,1	43,8	6,0	293,7	3 566 000,00
		11	M2	UX180-H6	36,6	25,0	6,0	184,8	
		12	M3	UX180-H6	21,7	9,7	6,0	94,2	
		22	M4	UX180-H6	29,1	16,5	4,0	91,1	
5	LA LIBERTAD	13	M1	UX180-H6	31,2	11,3	6,0	127,5	1 847 300,00
		14	M2	UX180-H6	35,4	14,1	6,0	148,5	
6	QUIRIO	16	M1	UX180-H6	23,1	11,5	6,0	103,8	1 774 000,00
		15	M2	UX180-H6	32,2	22,6	6,0	164,3	
7	SANTO DOMINGO	17	M1	UX100-H4	17,8	9,5	4,0	54,6	1 472 200,00
		18	M2	UX180-H6	32,6	24,3	6,0	170,7	
8	LA RONDA	19	M1	UX180-H6	30,0	19,9	6,0	149,7	2 152 600,00
		20	M2	UX180-H6	35,5	22,0	6,0	172,5	
9	HUAMPANI*	21	M1	UX180-H6	36,6	18,0	6,0	163,8	1 138 300,00
SUB TOTAL									17 987 935,00
IGV									3 237 828,30
TOTAL COÛT (S./)**									21 225 763,30
TOTAL COÛT (US\$)									6 585 511,87

a/ M1 = barrière la plus en amont

b/ Les types de barrières sont décrits dans le tableau 8

* Barrière installée dans le district de Chaclacayo (à l'ouest du Lurigancho-Chosica)

** S./ : Nuevo Sol (monnaie nationale du Pérou); 1 US\$ = S./ 3,2231, à 16 avril 2018 - (extrait du Banque centrale de réserve du Pérou, 2018)

SOURCE : 1/ ANA, 2018a ; 2/ ANA 2015b

Élaboration personnelle

Il est important de mentionner qu'une grande partie de la variation des coûts à l'échelle des torrents, en plus du nombre de barrières, est liée au transport des matériaux pour monter les barrières, car elles sont montées et ancrées *in-situ*, à une profondeur de 9,5 m sur la roche des berges des torrents (Ibid) (figure 30). Dans ce sens, il est nécessaire de préciser que dans certains torrents le transport des matériaux a été réalisé par voie terrestre, par des camions qui ont suivi le lit des torrents ou ses alentours. Cependant, dans quelques torrents dont les lits sont plus étroits (p. ex. ceux de Carossio, Corrales et La Libertad), les pièces et les matériaux d'installation des barrières ont été transportés par hélicoptère (ANA, 2015d) (figure 31), ce qui a fait notablement augmenter le coût.

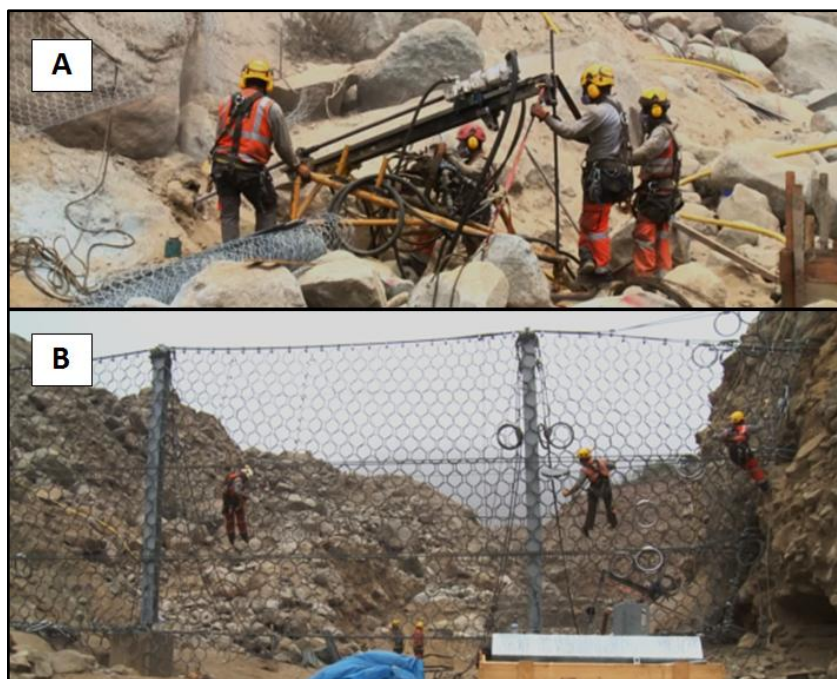


Figure 30. Installation de la barrière flexible # 4 dans le torrent Pedregal à Chosica,
 (A) Installation des ancrages au moyen de perforation dans la roche des berges du torrent
 (B) Installation du filet à anneaux et des câbles de support

SOURCE : ANA, 2016

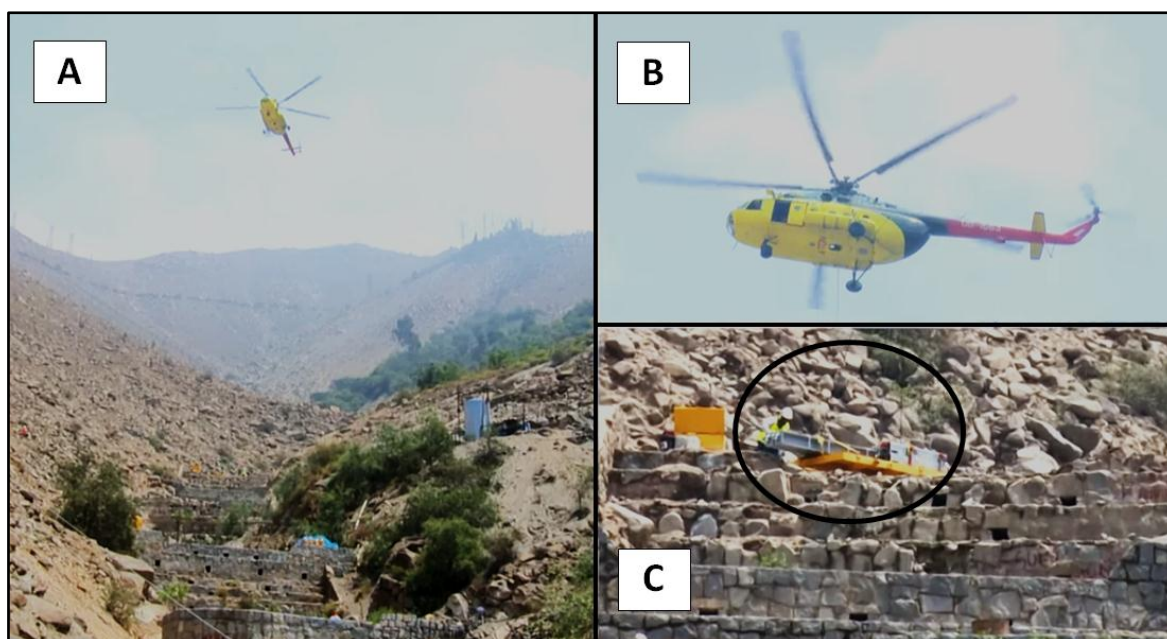


Figure 31. Transport par hélicoptère des matériaux pour installer la barrière flexible # 13 dans le torrent La Libertad à Chosica,
 (A) Hélicoptère au-dessus du torrent
 (B) Photo rapprochée de l'hélicoptère
 (C) Matériel déposé par l'hélicoptère

SOURCE : ANA, 2016

Par ailleurs, en observant une fois encore le tableau 12, nous pouvons dire que les longueurs de plusieurs barrières ont changé de manière considérable par rapport à ce qui était établi dans les spécifications techniques (tableau 8). Ces changements ont été liés à la géométrie des torrents et à la connaissance qu'avaient les ingénieurs sur les laves torrentielles locales. Par exemple, quelques-unes des barrières flexibles du type U ont eu des longueurs plus importantes que prévu, mais avec 2 supports intermédiaires comme prévu par les spécifications techniques pour ce type de barrière (figure 32). D'autres barrières ont dû être tellement longues qu'elles ont nécessité des supports intermédiaires plus nombreux, comme dans le cas de la barrière flexible # 10, localisée dans le torrent Carossio (le plus à l'amont dans le torrent – M1), où la structure de 54 m de longueur a nécessité 6 supports intermédiaires (figure 33).



Figure 32. Barrière flexible # 13 dans le torrent La Libertad à Chosica (barrière type UX avec 2 supports intermédiaires)

SOURCE : COE-CHOSICA, 2017



Figure 33. Barrière flexible # 10 dans le torrent Carossio à Chosica (barrière type UX avec 6 supports intermédiaires)

SOURCE : ANA, 2016

Les décisions relatives au nombre de barrières flexibles, à leurs dimensions et leurs localisations dans les torrents est fondée sur l'information obtenue dans le cadre de l'élaboration du projet (ANA, 2015a). De plus, en ce qui concerne l'intervention à Lurigancho-Chosica, l'ANA a reçu des commentaires et des conseils des autorités de la mairie de ce district compte tenu de leurs expériences en matière de laves torrentielles produites dans chaque torrent. Selon la mairie de Lurigancho-Chosica, les torrents les plus susceptibles de produire des laves torrentielles sont ceux de Pedregal et Carossio, raison pour laquelle, 4 barrières flexibles y ont été installées (communication personnelle le 22 février 2017, du chef du Centre d'Opérations de Secours Chosica – COE-CHOSICA, Monsieur José Martinez). De plus, si on observe la numérotation des barrières (3^{ème} colonne du tableau 12), nous pouvons constater que les chiffres suivent un ordre pour chaque torrent, mais à Carossio, entre la 3^{ème} et la 4^{ème} barrière (M3 et M4), la numérotation n'est pas continue (barrières # 12 et # 22 respectivement). Dans ce cas, intuitivement, nous comprenons que dans un premier temps, seulement 3 barrières auraient dû être installées à Carossio. Mais probablement à cause des avis de la mairie de Lurigancho-Chosica qui connaît l'histoire de ce torrent, il a été finalement décidé de placer une barrière supplémentaire.

La figure 34 montre la localisation des 21 barrières flexibles installées à Lurigancho-Chosica (précisément dans la ville de Chosica), qui se trouvent dans les 8 torrents de notre zone d'étude, et quelques informations extraites du tableau 12. Il faut souligner que dans le torrent La Libertad et dans le torrent Carossio, les barrières sont très proches les unes des autres, et aussi très proches de la zone peuplée (presque à 50 m de la première habitation pour la dernière barrière) (figure 35); la pente est si forte dans ce torrent qu'il était difficile d'en placer plus à l'amont.

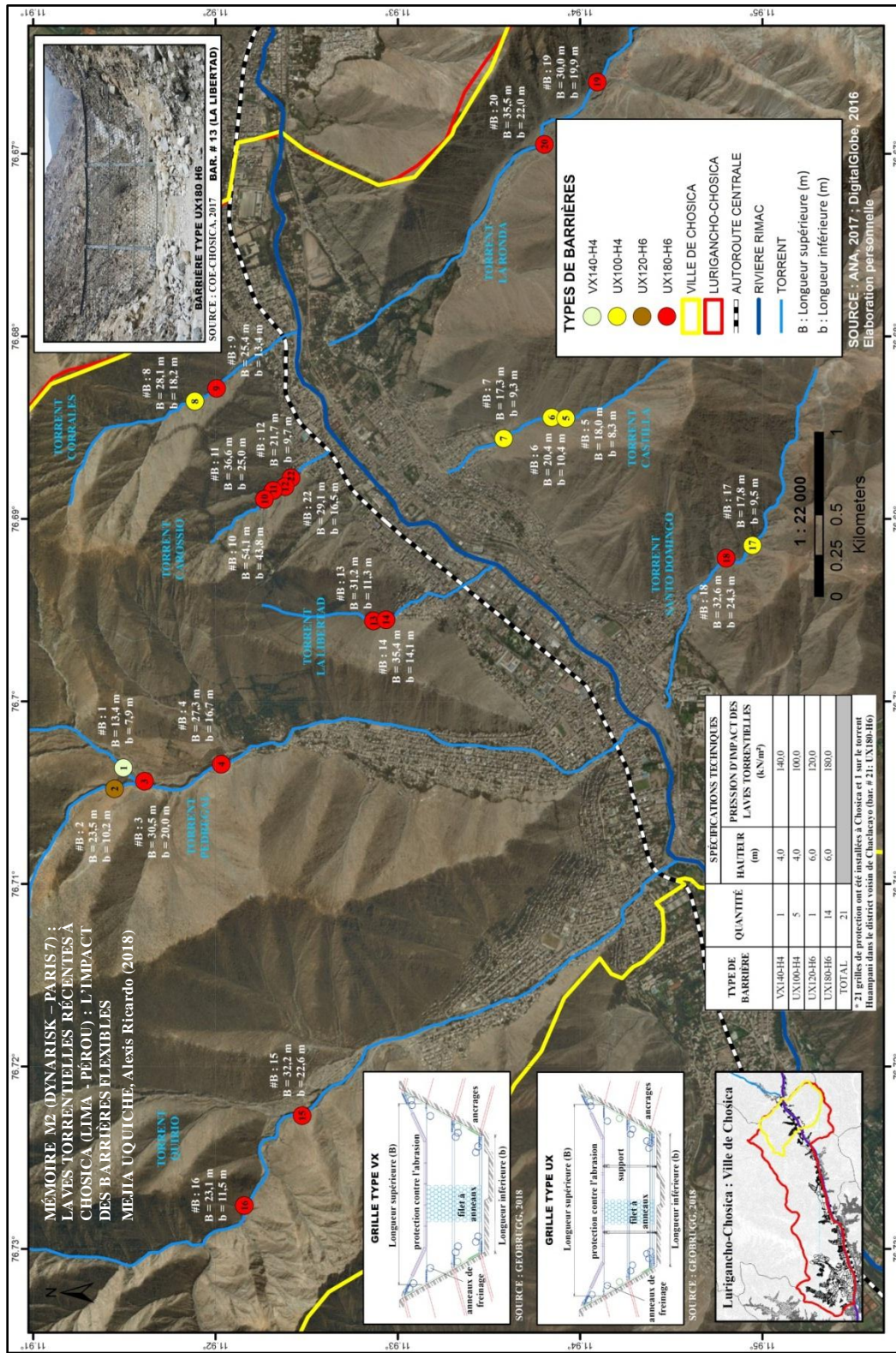


Figure 34. Localisation des 21 barrères flexibles installées dans la ville de Chosica

SOURCE : Geobruigg, 2018 ; ANA, 2017 ; DigitalGlobe, 2016
 Elaboration personnelle



Figure 35. Localisation des barrières dans le torrent Carossio à Chosica,
Les barrières sont très proches les unes des autres (entre 5 et 10 m) et très proches de la zone peuplée (qui commence à 50 m de la barrière la plus en aval)

SOURCE : GOOGLE EARTH, 2018, Elaboration personnelle, 2018

3.3. ANALYSE GEOMORPHOLOGIQUE SUR LA BASE DU MATERIEL RETENU PAR LES BARRIÈRES FLEXIBLES ET RELATION AVEC L'INTENSITÉ DES LAVES TORRENTIELLES

Dans notre zone d'étude, entre la date de finalisation de l'installation des barrières flexibles (février 2016) et aujourd'hui (avril 2018), des laves torrentielles se sont produites seulement au premier trimestre de 2017, période pour laquelle nous avons apprécié le fonctionnement de ces structures. Les barrières ont accompli leur objectif de retenir de grandes quantités du matériel du flux des laves torrentielles, qui, dans d'autres circonstances, seraient arrivées à l'aval des torrents, là où se localise la population, produisant des dégâts considérables.

Par ailleurs, en plus de l'installation des barrières flexibles, l'ANA a assumé la responsabilité de réaliser les travaux de nettoyage du matériel retenu et l'entretien de ces structures quand c'est nécessaire, c'est-à-dire s'il y a une grande quantité de matériel

retenu et si les barrières sont endommagées. Un diagnostic est réalisé après chaque épisode de laves torrentielles. Donc, après le premier trimestre de 2017, l'ANA a fait une inspection des 22 barrières flexibles (21 à Lurigancho-Chosica et 1 à Chaclacayo), concluant que son intervention était nécessaire à cause de la grande quantité de matériel retenu (figure 36), et à cause des dommages aux barrières, surtout dans les ancrages, dans les éléments de protection contre l'abrasion et dans la partie inférieure des barrières (figure 37). Il est notable que les barrières flexibles ne se sont pas effondrées, comme cela se produit souvent avec les digues qui sont plus rigides (communication personnelle le 19 février 2018, du contrôleur général des travaux de nettoyage des Barrières Dynamiques de l'ANA, Monsieur Felix Caubi).

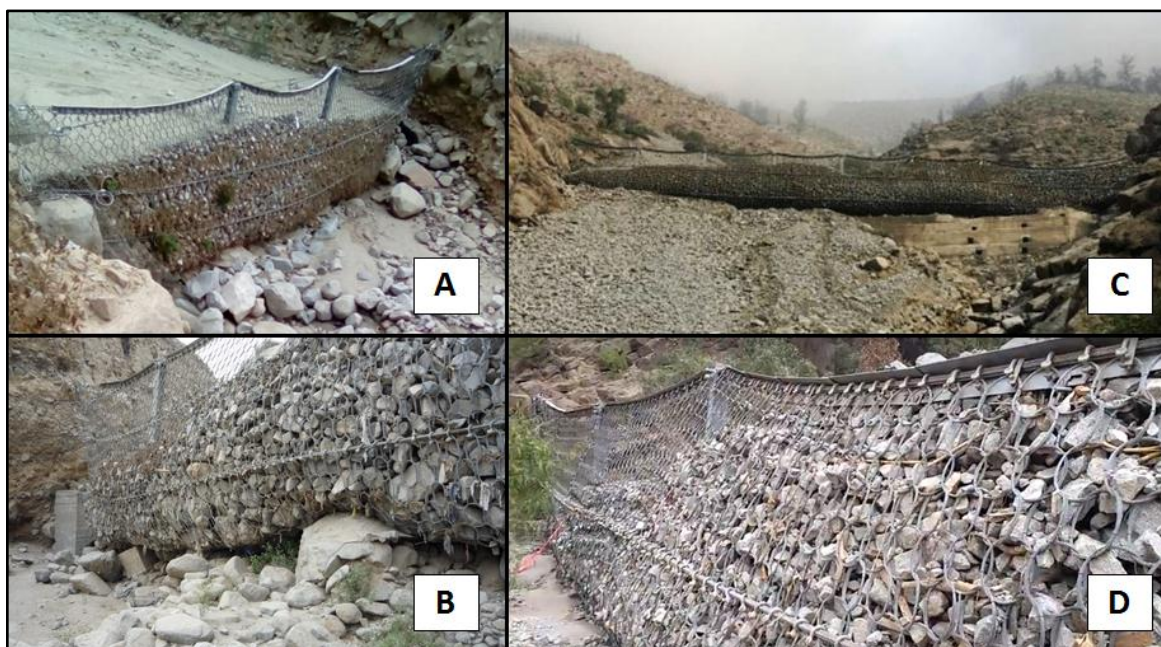


Figure 36. Matériel retenu par les barrières flexibles à Chosica,

- (A) Barrière flexible # 3 dans le torrent Pedregal
- (B) Barrière flexible # 15 dans le torrent Quirio
- (C) Barrière flexible # 10 dans le torrent Carossio
- (D) Barrière flexible # 11 dans le torrent Carossio

SOURCE : ANA, 2018b

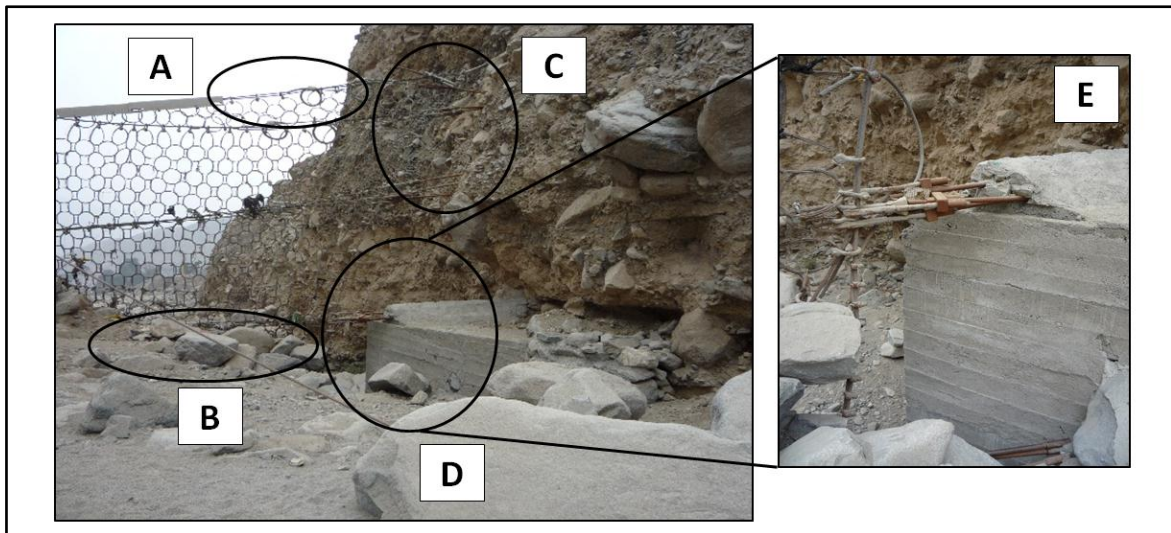


Figure 37. Dommages subis par la barrière # 15 dans le torrent Quirio,

- (A) Une partie de l'élément de protection contre l'abrasion a disparu
- (B) Dommages dans la partie inférieure de la barrière
- (C) Une grande partie des roches de la berge où les ancrages ont été perforées, ont disparu, laissant les ancrages sans protection
- (D) La structure de béton qui a été construite afin d'y fixer l'ancrage inférieur a été endommagée, laissant cet ancrage sans protection
- (E) Zoom de l'état de l'ancrage inférieur

SOURCE : ANA, 2018b

C'est ainsi que l'ANA a élaboré un projet nommé *Descolmatación y conservación de barreras dinámicas contra el flujo de detritos* (« Nettoyage et conservation des barrières flexibles face aux laves torrentielles », en espagnol) dans le but d'accomplir ce qui est de sa responsabilité pour les 22 barrières installées à Lima. Même si l'étude de ce projet a été finalisée quelques mois après le premier trimestre 2017, les activités de nettoyage (élimination du matériel retenu) et d'entretien des barrières (renforcement des ancrages et de la base des barrières avec du béton) n'ont commencé qu'au début de l'année 2018, car le Ministère n'avait pas de budget pour le faire en 2017 (communication personnelle le 19 février 2018, du contrôleur général des travaux de nettoyage des Barrières Dynamiques de l'ANA, Monsieur Felix Caubi). Donc, pour la mise en œuvre du projet, l'ANA, instance de surveillance de contrôle, a contracté 3 entreprises sous-traitantes pour faire les travaux correspondants (figure 38 et 39).



Figure 38. Travaux de nettoyage et de renforcement des barrières à Chosica,
 (A) Nettoyage de la barrière # 15 (torrent Quirio) avec une pelleteuse
 (B) Nettoyage manuel de la barrière # 20 (torrent La Ronda) avec des outils
 (C) Construction d'un mur de béton à la base de la barrière # 4 (torrent Pedregal)
 (D) Construction d'un mur de béton armé aux extrémités de la barrière # 17 (torrent Santo Domingo)

SOURCE : ANA, 2018b



Figure 39. Actions de surveillance de l'ANA au niveau de la barrière #13 du torrent La Libertad,

De gauche à droite : Une ingénieure et un ouvrier de l'entreprise sous-traitante « Consorcio Virgen de la Puerta », et un ingénieur et un topographe de l'ANA ; ces deux derniers vérifient les travaux de renforcement de la barrière # 13

SOURCE : Élaboration personnelle, 2018

Le tableau 11 présente le coût de tous ces travaux pour chacun des 8 torrents de Chosica, leur durée, leur date de début, leur date de fin programmée et quelques dates de fin réelles au 18 février 2018 (date de ma visite au bureau de l'ANA). Du coût total (environ 3 millions de *nuevos soles*¹⁷, c'est-à-dire, environ 900 000 dollars), plus d'un tiers (35,1 %) correspond aux travaux réalisés à Carossio, suivi de loin par le coût des travaux dans le torrent Pedregal qui représente presque 20 % du total. Compte tenu de cette première information et considérant que ces deux torrents possèdent le plus grand nombre de barrières (4 chacun), nous supposons que probablement leurs barrières ont retenu une grande quantité de matériel, et, par déduction que Carossio et Pedregal sont les torrents les plus susceptibles de produire du matériel provenant des laves torrentielles.

Tableau 11. Coût et dates des travaux de nettoyage et de protection des barrières flexibles à Chosica établis à la fin de 2017

N°	TORRENT	ENTREPRISE SOUS-TRAITANT	DATE DU CONTRAT	DUREE THÉORIQUE	DATE DE DEBUT	DATE LIMITE	DATE FIN. RÉELLE 1/	COÛT (S./)	%
1	PEDREGAL	PISONAY INVERSIONES	18/12/17	61	27/12/17	25/02/18	-	609 065,13	19,4
2	MARISCAL CASTILLA	PISONAY INVERSIONES	18/12/17	42	28/12/17	07/02/18	09/02/18	125 032,41	4,0
3	CORRALES	PISONAY INVERSIONES	18/12/17	19	28/12/17	15/01/18	09/02/18	97 522,42	3,1
4	CAROSSIO	CONSORCIO SAN MIGUEL	23/01/18	68	30/01/18	07/04/18	-	1 099 317,11	35,1
5	LA LIBERTAD	CONSORCIO VIRGEN DE LA PUERTA	24/01/18	26	01/02/18	27/02/18	-	90 476,25	2,9
6	QUIRIO	PISONAY INVERSIONES	18/12/17	54	27/12/17	18/02/18	-	471 284,42	15,0
7	SANTO DOMINGO	PISONAY INVERSIONES	18/12/17	33	28/12/17	29/01/18	09/02/18	120 370,64	3,8
8	LA RONDA	PISONAY INVERSIONES	18/12/17	54	27/12/17	18/02/18	-	521 096,90	16,6
TOTAL COÛT (S./) 2/								3 134 165,28	100,0
TOTAL COÛT (US\$)								972 407,09	

1/ Date de finalisation des travaux au 18 février 2018 (date de ma visite au bureau de l'ANA)

2/ S. : Nuevo Sol (monnaie nationale du Pérou); 1 US\$ = S/. 3,2231, le 16 avril 2018 - (extrait du Banque centrale de réserve du Pérou, 2018)

SOURCE : ANA, 2018a

Élaboration personnelle

Afin de confirmer et détailler cette première impression, nous allons faire ci-dessous une description géomorphologique des torrents de Chosica, et ensuite, sur la base du projet qui décrit les actions à réaliser et des avis des superviseurs de l'ANA, le matériel retenu par les barrières sera analysé. Ces deux informations nous donneront une idée plus claire sur le

¹⁷ Le *Nuevo Sol* (S./) est la monnaie nationale du Pérou ; 1 US\$ = S/. 3,2231, en 16 avril 2018 - (extrait de la Banque centrale de réserve du Pérou, 2018)

comportement géomorphologique des torrents de Chosica face aux laves torrentielles de 2017, et nous permettront de les associer à l'intensité des écoulements torrentiels.

3.3.1. Géomorphologie des torrents à Chosica

Quelques documents (Guadalupe et Carrillo, 2012 ; Nuñez *et al.*, 2015) ont bien décrit la géomorphologie de 4 torrents de la ville de Chosica (Quirio, Pedregal, Carossio et Corrales), ceux qui se déclenchent le plus fréquemment et qui ont produit des dégâts (surtout en 1987, la date considérée comme la plus catastrophique en matière de laves torrentielles à Chosica). L'annexe 4 décrit la géomorphologie de chacun des 4 bassins. Cependant, ci-dessous, nous présentons quelques caractéristiques générales qui les concernent tous et qui concernent très probablement, aussi, les 4 autres torrents de notre zone d'étude (Mariscal Castilla, La Libertad, Santo Domingo et La Ronda) :

- La roche mère est constituée par des roches intrusives (roches magmatiques plutoniques) comme les granodiorites et les granites, qui sont fortement fracturées et météorisées. Les produits de cette météorisation sont des blocs de grandes dimensions, des galets, des graviers, des sables, et des limons mais en plus faibles quantités. Le matériau rocheux de couverture est formé par des dépôts quaternaires, c'est-à-dire des matériaux colluviaux (dans les flancs du torrent, souvent de façon instable) et des matériaux proluviaux (dans le cône de déjection du torrent, transportés par d'anciennes laves torrentielles), sous forme de blocs de tailles différentes et de sables (Guadalupe et Carrillo, 2012).
- Les affluents des torrents ont des pentes entre 20° et 45°, qui transportent des sédiments vers le lit du torrent dans la partie centrale du bassin versant torrentiel (Nuñez *et al.*, 2015).
- La population qui habite sur les torrents se localise dans le cône de déjection, mais aussi aux côtés du torrent dans la partie inférieure et centrale du bassin versant torrentiel, sur des terrasses de matériel colluvial, créés par les flux de sédiments des affluents du torrent (Ibid).

Les différences entre les 4 torrents décrits dans les documents sont plutôt liées à la géométrie des bassins versant torrentiels. Dans le but de connaître ces caractéristiques, non

seulement pour les 4 torrents, mais pour les 8 torrents de la zone d'étude, leurs dimensions approximatives et d'autres détails sont présentés dans le tableau 12.

Tableau 12. Caractéristiques de la géométrie des 8 bassins versant torrentiels de la zone d'étude

TORRENT	SUPERF. DU BVT (km ²)	LONGUEUR DU TORRENT (km)	ALTIITUDE EN AMONT DU BVT (m)	PENTE MOYENNE DU BVT (%)	CHENAL PRINCIPAL DU TORRENT			
					PARTIE CENTRALE DU BVT		PARTIE INFÉRIEURE DU BVT	
					LARGEUR MOYENNE (m)	PROF. MOYENNE (m)	LARGEUR MOYENNE (m)	PROF. MOYENNE 1/ (m)
PEDREGAL	10,0	5,0	2000	30	20	20	15	10
MARISCAL CASTILLA	1,0	1,8	1700	38	15	5	8	1
CORRALES	1,0	2,0	1800	40	15	10	15	5
CAROSSIO	0,5	0,7	1400	40	8	5	6	0
LA LIBERTAD	0,7	1,7	1400	30	15	5	6	1
QUIRIO	11,0	5,0	1800	28	25	15	15	5
SANTO DOMINGO	4,0	2,5	1800	25	12	5	8	2
LA RONDA	7,5	4,5	2000	25	15	5	6	1

* BVT : Bassin versant torrentiel

1/ La profondeur du chenal de tous les torrents diminue jusqu'à environ 1 ou 2 mètres à la confluence avec la rivière Rímac (qui est canalisée par des murs en béton pour protéger les logements sur les côtés), sauf celui du torrent Carossio, dont le chenal a été transformé en une piste asphaltée, presque au niveau des logements qui se trouvent sur les côtés.

SOURCE : GOOGLE EARTH, 2018 ; Nuñez *et al.*, 2015; Guadalupe et Carrillo, 2012

Elaboration personnelle

Dans le tableau 12, nous pouvons observer que les bassins versants torrentiels des torrents Quirio et Pedregal sont ceux qui possèdent la superficie la plus élevée (environ 11 km² et 10 km² respectivement) alors que les plus petits sont ceux de Corrales, Mariscal Castilla, La Libertad et Carossio (environ 1,5 km², 1 km², 0,7 km² et 0,5 km² respectivement). Le point le plus à l'aval de tous les bassins versants torrentiels se localisent environ à la même altitude (entre 850 m et 900 m, au niveau de la rivière Rímac). Or les 4 plus petits, malgré leur extension réduite, ont des altitudes en amont proches de celles des 3 plus grands (principalement pour Mariscal Castilla et Corrales, à environ 1700 m). Cette situation est due au fait que les plus petits bassins versants torrentiels ont les pentes les plus fortes, les plus élevées étant celles des torrents Carossio et Corrales (environ 40 %). Dans la partie centrale des bassins versants torrentiels (zone où il n'y pas pratiquement pas de population), la largeur du chenal est plus grande que dans la partie inférieure, où leur taille a été réduite par l'aménagement de terrasses de matériel colluvial sur les flancs des torrents en vue de favoriser l'urbanisation. Une réduction notable de la largeur du chenal entre la partie centrale et la partie inférieure du bassin versant torrentiel, est observée dans le

torrent La Libertad, dont le chenal a été divisé en deux chenaux bien étroits (figure 40), et celui de Mariscal Castilla et de La Ronda. La diminution de la profondeur est liée dans tous les cas au fait que la pente des torrents décroît à l'approche de la confluence avec la rivière Rímac ; même si quelques torrents ont encore une profondeur importante dans la partie inférieure du bassin versant torrentiel, presque tous finissent avec une profondeur comprise entre 1 et 2 m (figure 41). Le torrent Carossio fait exception à cette règle, car à partir de la zone où il y a des logements, à l'amont, le chenal a été transformé en une piste asphaltée, presque au niveau des logements qui se trouvent sur les côtés (figure 42).



Figure 40. Chenal de la partie inférieure du bassin versant torrentiel de La Libertad,
 (A) Chenal divisé en deux chenaux bien étroits
 (B) Chenal étroit, celui de droite de la figure 42A

SOURCE : Élaboration personnelle, 2018

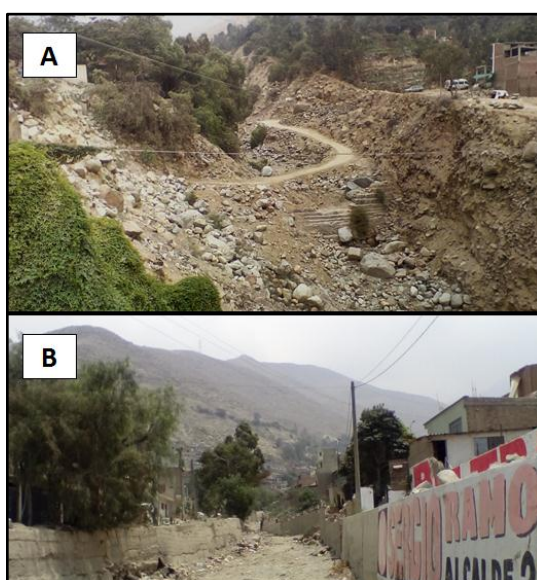


Figure 41. Variation de la profondeur du chenal du torrent Pedregal,
 (A) Chenal de la partie centrale du bassin versant torrentiel (profondeur : 20 m)
 (B) Chenal de la partie inférieure du bassin versant torrentiel (profondeur : 2 m)

SOURCE : Élaboration personnelle, 2018



Figure 42. Chenal du torrent Carossio transformé en une piste asphaltée, presque au niveau des logements

SOURCE : Élaboration personnelle, 2018

Grâce ces caractéristiques, nous pouvons conclure, que les bassins versants torrentiels de Pedregal et Quirio sont ceux qui, compte tenu de leurs fortes superficies, seraient les plus susceptibles de produire les plus importantes quantités de matériel de laves torrentielles. Cependant, la pente joue un rôle très important ; à cet égard, Carossio, Corrales et Mariscal Castilla pourraient produire aussi d'importantes quantités de matériel, tombant plus facilement et plus rapidement de l'amont et accroissant l'intensité du flux. Enfin, les torrents La Libertad et Carossio seraient les plus susceptibles de produire des dégâts à cause de la proximité de leurs chenaux avec les logements ; surtout celui de Carossio, car le chenal, et donc les flux, se localisent au même niveau que les logements.

3.3.2. Quantité de matériel retenu par les barrières flexibles et relation avec l'intensité des laves torrentielles

Selon l'analyse que nous avons faite dans la section précédente, on ne sait pas quel torrent produit le flux de lave torrentielle le plus intense, c'est-à-dire, selon notre analyse de la classification de l'intensité, quel torrent produit le plus de matériel sédimentaire disponible pour le transport¹⁸, soit du fait de sa taille, soit du fait de sa pente. Cependant, grâce à la quantité de matériel retenu par les barrières de chaque torrent, nous pouvons avoir un

¹⁸ Notre classification de l'intensité des écoulements torrentiels (faite dans le sous-chapitre 1.3) est basée sur le type de matériau concerné par le flux. Les 4 types sont les suivants: écoulement hyper-concentré d'un volume de moyenne-petite taille – intensité = 1 ; écoulement hyper-concentré d'un volume de grande taille – intensité = 2 ; lave torrentielle à matrice boueuse – intensité = 3 ; lave torrentielle à matrice granulaire – intensité = 4. Donc, le matériel sédimentaire contenu dans le flux est lié à l'intensité (plus il y a de matériel sédimentaire disponible pour le transport, plus intense est le flux).

indicateur du matériel disponible pour le transport au niveau de torrent, et ainsi, une base plus solide pour affirmer quel torrent produit le flux le plus intense.

Le matériel retenu par barrière a été obtenu dans le cadre du projet « Nettoyage et conservation des barrières dynamiques face aux laves torrentielles » de l'ANA. Son volume pour chaque barrière a été calculé au moyen de la différence volumétrique entre la topographie du lit du torrent en amont de la barrière, avant et après la production des laves torrentielle en 2017 (après l'installation de la barrière – février 2016 ; après les laves torrentielle de 2017 – avril 2017). Des cartes *As-Built* (des cartes en 3D) ont été élaborées afin de comparer la situation initiale et finale de la topographie, et à partir de ces informations, et grâce au logiciel CIVIL 3D, la valeur du volume a été calculée (ANA, 2017).

Dans le tableau 13, nous présentons donc la quantité de matériel retenu par barrière et au niveau de chaque torrent lors des laves torrentielles de 2017, ainsi que d'autres détails, comme la surface couverte par ce matériel et sa hauteur. De plus, la méthode de Jenks est utilisée pour discrétiser la quantité de matériel retenu par les 21 barrières et créer quatre classes de volume retenu (nul, faible, moyen, élevé, très élevé) (tableau 14). Celles-ci nous permettent de représenter cartographiquement ces volumes (figure 43).

Il est important de dire que les données sur le matériel retenu calculées par l'ANA n'ont pas pour but d'étudier la géomorphologie des torrents, mais sont destinées à faire des calculs de coût des travaux de nettoyage des barrières. C'est ainsi que quand nous avons visité les torrents dans le cadre de cette recherche (en février 2018), le matériel avait déjà été retiré mais sans être étudié ni décrit préalablement ; la plus grande partie a été jeté dans la décharge appelé « Las Gambusinas » (localisée dans le district voisin de Santa Eulalia), et une petite partie a été utilisée pour fabriquer le béton pour les ouvrages de renforcement des barrières. Même si ces actions (nettoyage et élimination du matériel retenu) font partie des objectifs du projet, celui-ci ne bénéficiera malheureusement pas d'une information précieuse sur la qualité du matériel retenu. Cependant, grâce à l'information que nous avons récupérée et traitée, (présenté dans le tableau 13), il est possible de faire une analyse quantitative du matériel retenu par les barrières.

Tableau 13. Information quantitative sur le matériel retenu par les barrières flexibles à Chosica lors des laves torrentielles de 2017

N°	TORRENT	INFORMATION DES BARRIÈRES 1/			INFORMATION DU MATERIEL RETENU PAR LES BARRIÈRES 2/					
		N° BAR.	N° BARRIÈRE DANS LE TORRENT	HAUTEUR DE LA BARRIÈRE (m)	HAUTEUR DU MATERIEL RETENU PAR LA BARRIÈRE (m)	SURFACE DE LA BARRIÈRE COUVERTE PAR LE MATERIEL (%) a/	VOLUME DU MATERIEL RETENU PAR BARRIÈRE		VOLUME DU MATERIEL RETENU PAR TORRENT	
							m ³	% b/	m ³	% c/
1	PEDREGAL	2	M1	6,0	1,5 – 5,7	69,0	1180,0	8,0	4392,4	29,6
		1	M2	4,0	-	-	0,0	0,0		
		3	M3	6,0	3,7 – 4,7	65,0	3212,4	21,7		
		4	M4	6,0	-	-	0,0	0,0		
2	MARISCAL CASTILLA	5	M1	4,0	-	-	0,0	0,0	36,3	0,2
		6	M2	4,0	-	-	0,0	0,0		
		7	M3	4,0	0,9	15,0	36,3	0,2		
3	CORRALES	8	M1	4,0	-	-	0,0	0,0	0,0	0,0
		9	M2	6,0	-	-	0,0	0,0		
4	CAROSSIO	10	M1	6,0	3,1 – 5,9	83,0	2301,4	15,5	3232,2	21,8
		11	M2	6,0	2,9 – 5,9	82,0	876,2	5,9		
		12	M3	6,0	0,5 – 0,75	7,0	11,1	0,1		
		22	M4	4,0	1,2 – 1,4	20,0	43,5	0,3		
5	LA LIBERTAD	13	M1	6,0	-	-	0,0	0,0	34,0	0,2
		14	M2	6,0	0,5	10,0	34,0	0,2		
6	QUIRIO	16	M1	6,0	1,4 – 6,0	65,0	1040,4	7,0	4001,8	27,0
		15	M2	6,0	1,9 – 4,7	50,0	2961,4	20,0		
7	SANTO DOMINGO	17	M1	4,0	0,55	10,0	73,4	0,5	73,4	0,5
		18	M2	6,0	-	-	0,0	0,0		
8	LA RONDA	19	M1	6,0	1,8 – 2,8	36,0	1317,8	8,9	3067,3	20,7
		20	M2	6,0	1,2 – 3,0	38,0	1749,5	11,8		
TOTAL							14837,5	100,0	14837,5	100,0

a/ La surface de la barrière est présentée dans le tableau 10

b/ Pourcentage de matériel retenu par chaque barrière, par rapport au total (14837,5 m³)

c/ Pourcentage du matériel total retenu dans chaque torrent, par rapport au total (14837,5 m³)

SOURCE : 1/ANA, 2018a ; 2/ ANA, 2017

Elaboration personnelle

Tableau 14. Classification des barrières flexibles à Chosica selon le volume retenu lors des laves torrentielles de 2017

VOLUME	CLASSES* (m ³)	NOMBRE DE BARRIÈRES DANS LA CLASSE	% TOTAL
NUL	0	8	38,1
FAIBLE	[10,0 – 100,0]	5	23,8
MOYEN	[100,1 – 1500,0]	4	19,0
ÉLEVÉ	[1500,1 – 2500,0]	2	9,5
TRÈS ÉLEVÉ	[2500,1 – 3212,4]	2	9,5
TOTAL		21	100,0

* Classification par la méthode de Jenks

SOURCE : ANA, 2017

Elaboration personnelle

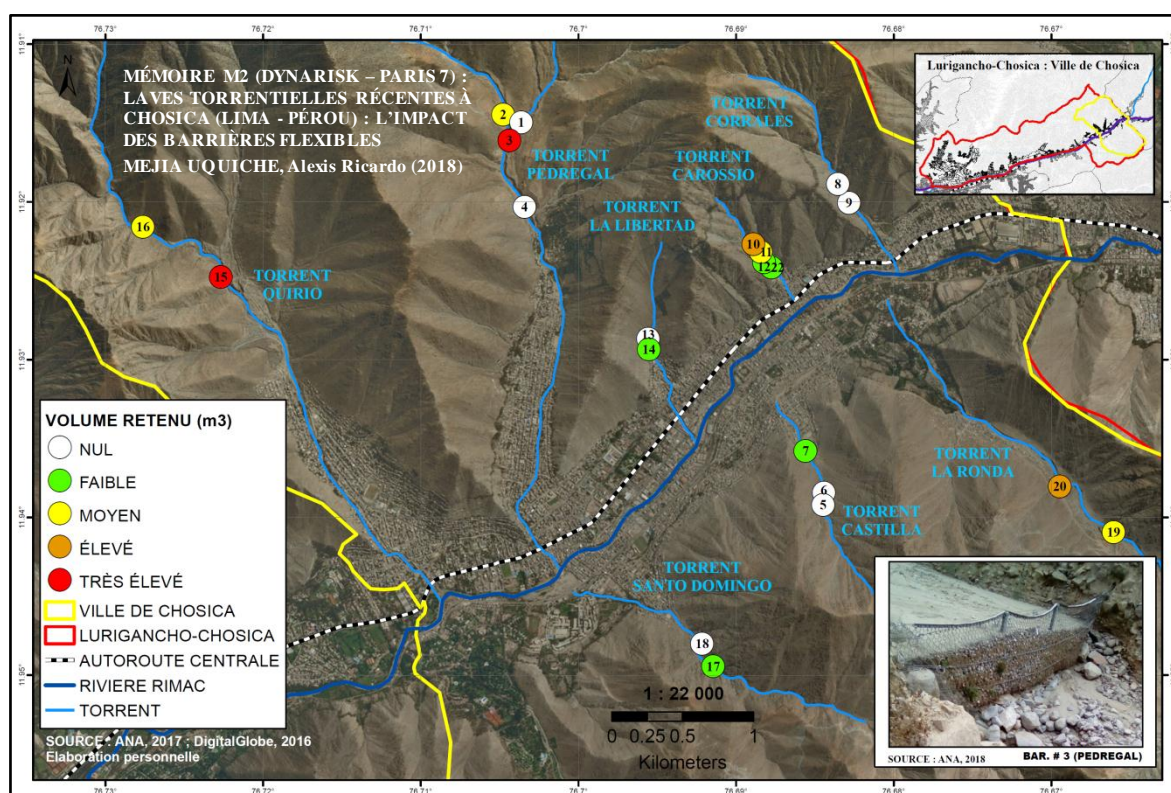


Figure 43. Barrières flexibles à Chosica selon le volume retenu lors des laves torrentielles de 2017

SOURCE : ANA, 2017, DigitalGlobe, 2016
Élaboration personnelle

La quantité retenue est au total de 14837,5 m³. La barrière qui a retenu la quantité la plus importante a été la barrière # 3 (à Pedregal), suivi par la barrière # 15 (à Quirio), la barrière # 10 (à Carossio) et la barrière # 20 (à La Ronda) ; ces quantités représentent 21,7 %, 20,0 %, 15,5 % et 11,8 %, respectivement, du total. Toutefois, en ce qui concerne le pourcentage de surface de barrière couverte par le matériel (qui est presque proportionnel à

la hauteur atteinte par le matériel), les barrières # 10 et # 11 (toutes deux à Carossio) sont celles qui ont obtenu les valeurs les plus fortes (couvertes à 83 % et 82 %, respectivement), suivies par les barrières # 2 et # 3 (toutes deux à Pedregal), et par la barrière # 16 à Quirio (couvertes à hauteur de 69 %, 65 % et 65 %, respectivement). Comme le matériel retenu a été calculé sur la base du volume du lit du torrent à une certaine distance en amont de la barrière, les torrents Pedregal et Quirio ont plus de matériel car ils ont les lits les plus grands. Cependant, si on considère les pourcentages de surfaces couvertes par le matériel, ceux des barrières de Carossio sont plus forts, car le matériel se concentre dans un lit plus petit.

Par ailleurs, selon la classification faite dans le tableau 14 (et montré dans la figure 43), les deux barrières qui ont retenu les plus grandes quantités (# 3 et # 15) sont dans la catégorie des volumes très élevés (environ 3200 m³ et 2900 m³), alors que les deux suivantes (# 10 et # 20) appartiennent à la catégorie des volumes élevés (environ 2300 m³ et 1700 m³). De plus, des volumes moyens et faibles ont été retenus par des 4 et 5 barrières, respectivement et 8 barrières n'ont pas retenu de matériel (volume nul). Il est possible que la barrière # 18 (à Santo Domingo) et la barrière # 4 (à Pedregal) n'aient pas retenu de matériel car les barrières en amont de celles-ci l'ont probablement fait. Cependant, pour les 5 autres barrières (qui se localisent dans les torrents La Libertad, Pedregal, Mariscal Castilla et Corrales), cette situation n'est pas possible car ce sont elles qui se trouvent en amont et il n'y a aucune autre structure qui retient le matériel plus en amont. Donc, dans ces cas-là, le matériel retenu par une barrière d'aval se forme entre cette barrière et la plus proche en amont, à cause du transport de matériel venant des affluents du torrent, ou aussi à cause de l'érosion du lit du torrent. Pour illustrer ce cas, considérons les 3 barrières les plus en amont dans le torrent de Pedregal (figure 43). Ici, le flux ne serait pas passé par la barrière # 1, mais par la barrière # 2 ; cependant, la barrière # 3 aurait reçu une partie du flux de cette dernière (de la barrière # 2), laquelle aurait érodé le lit du torrent dans le tronçon en amont de cette barrière # 3, et probablement aussi, aurait retenu d'autres matériels transportés par les affluents latéraux. Cela permet de comprendre pourquoi la barrière # 3 a retenu un volume de matériel plus important que les barrières plus en amont. La même chose s'est produite pour les barrières de Mariscal Castilla et de La Libertad, alors que dans le cas du torrent Corrales, compte tenu du fait qu'aucune des barrières n'a retenu de matériel, nous pouvons dire que la quantité de matériel transporté dans ce torrent a été très faible.

En analysant la quantité de matériel au niveau des torrents (tableau 13), ceux de Mariscal Castilla, La Libertad et Santo Domingo, en plus du torrent Corrales, n'ont pas transporté de matériel sédimentaire (les volumes retenus au niveau du torrent n'atteignant pas 1% du matériel retenu total). Au contraire, les torrents qui ont retenu la plus grande quantité ont été Pedregal (29,6 % du total, 14837 m³), suivi de Quirio (27,0 %), et de Carossio (21,8 %). Donc, les torrents qui produisent les flux les plus intenses sont Pedregal et Quirio, et le facteur « dimensions » des torrents (dimension de Pedregal et Quirio > dimension de Carossio) a plus d'importance que le facteur « pente » (pente de Pedregal et Quirio < pente de Carossio). Cependant, si nous calculons le ratio entre le volume retenu et la superficie du bassin versant torrentiel de ces trois torrents ainsi que de La Ronda (qui est à la quatrième position), nous obtenons les valeurs suivantes : $I_{\text{PEDREGAL}} = 439,2$; $I_{\text{QUIRIO}} = 363,8$; $I_{\text{CAROSSIO}} = 6464,4$; $I_{\text{LA_RONDA}} = 409,0$. La valeur de Carossio est très supérieure aux autres, car sa surface est presque 20 fois petite que celles des autres. Donc, dans ce cas, la quantité du matériel retenu n'est pas proportionnelle à la taille du bassin versant torrentiel mais à la forte pente.

Finalement, si on compare l'information sur le matériel retenu et l'intensité des écoulements torrentiels par torrent (tableau 4 du sous-chapitre 1.3), nous pouvons comprendre clairement que la réduction de l'intensité des flux de laves torrentielles est due à la mise en place des barrières qui ont retenu une grande quantité de sédiments. S'il n'y avait pas eu de barrières, il est sûr qu'une grande partie de ces sédiments aurait été déplacée vers les zones en aval où se trouve la population, de telle sorte que dans notre tableau 4, nous aurions eu plus d'enregistrements d'écoulements de très forte intensité en 2017. Cependant, il y a eu quand même des écoulements avec des intensités fortes et très fortes cette année-là, qui sont liés, comme nous l'avons dit précédemment, au déplacement d'autres matériels sédimentaires fournis par les affluents en aval des barrières, et/ou par l'érosion du lit du torrent dans les tronçons à l'aval des barrières (principalement pour les torrents qui ont de grands bassins versants). Cette dernière supposition a été confirmée par les témoignages de quelques habitants des torrents Pedregal et Quirio :

- Dans le cas du torrent Pedregal, dans la zone où se trouve la population la plus à l'amont (où il n'y a pas de barrières), le flux du torrent du 16 mars 2017 a reçu des apports sédimentaires des affluents latéraux, ce qui fait qu'il s'est déplacé avec une forte intensité, y compris en générant une trajectoire parallèle au lit du torrent

(communication personnelle le 23 février 2018, d'une leader du quartier San Antonio - 2ème Zone – torrent Pedregal, Madame Victoria Prudencio).

- Et dans le cas du torrent Quirio, le flux du 16 mars 2017 est arrivé aussi dans la partie inférieure du bassin versant torrentiel (probablement un écoulement hyper-concentré, car les matériels ont été retenus par les barrières), mais avec une grande force qui finalement a érodé le lit du torrent, de telle sorte que le flux contenant les sédiments du lit a été perçu par la population en aval. En conséquence, plusieurs logements proches du lit ont été endommagés, et selon l'opinion de quelques habitants de ces zones, les barrières n'ont apporté aucun bénéfice, car de toute façon, elles ont été fortement affectées (communication personnelle le 28 février 2018, d'un leader du quartier Nicolás del Piérola – torrent Quirio, Monsieur Orlando Jimenez).

CONCLUSION

L'installation de 21 barrières flexibles dans les zones en amont de 8 torrents de la ville de Chosica (Pedregal, Mariscal Castilla, Corrales, Carossio, La Libertad, Quirio, Santo Domingo et La Ronda) a eu pour objectif de retenir des matériels sédimentaires de grande dimension, de façon à éviter que des flux torrentiels de forte intensité arrivent dans les zones peuplées en aval. Notre problématique était de savoir s'il y a eu un réel changement dans l'intensité des flux dans les zones en aval, avant et après l'installation de ces structures, de vérifier aussi si ce changement d'intensité ne s'est pas simplement produit à cause de différences dans les précipitations et d'essayer de trouver une relation entre l'intensité des laves torrentielles et les caractéristiques géomorphologiques des torrents.

Pour répondre à ces questions, nous avons formulé 4 hypothèses fondées principalement sur 3 sources d'information : la classification des écoulements torrentiels enregistrés en 2012, 2015 et 2017 selon leur intensité, elle-même fondée sur la composition des flux ; les données de précipitations ; et la quantité de matériel retenu par les barrières flexibles face aux laves torrentielles de 2017.

Avant de valider ou infirmer nos hypothèses, nous avons fait une analyse de la situation physique et de la situation socio-économique de la ville de Chosica, ainsi que des conséquences des derniers épisodes de laves torrentielles (en 2012, 2015 et 2017). Celle-ci nous a permis de comprendre que Chosica est une zone hautement sensible à la production des laves torrentielles (fréquence entre 2 et 5 ans). De plus, puisque sa localisation permet de relier la ville de Lima avec les régions de la *Sierra* du Pérou par le biais d'une route interprovinciale (l'Autoroute Centrale), la ville de Chosica est une zone qui possède une importance économique nationale, et, à cause de cela, il s'agit d'un endroit attrayant pour la population. De ce fait, il y a eu un développement urbain tentaculaire, avec environ 36 % de la population vivant sur les pentes des collines, là où se trouvent les torrents. Par conséquent, le déclenchement des torrents de Chosica (qui se produit entre les mois de janvier et avril), a généré des pertes économiques et humaines (p. ex. en 2012 et 2015).

Compte tenu de l'importance des laves torrentielles à Chosica, plusieurs documents décrivent leurs déroulements qui comportent y compris des informations sur la

composition des flux qui sont arrivés en aval des torrents. Ces informations ainsi que les témoignages des autorités et des habitants de Chosica nous ont permis d'évaluer notre première hypothèse : « l'intensité des laves torrentielles de la ville de Chosica en 2017 a été moins importante qu'en 2012 et 2015 ».

Pour cela, nous avons créé un indicateur de l'intensité des écoulements torrentiels selon la composition des flux. Sur la base du volume du flux et selon qu'il contient ou non de grandes quantités de roches, nous avons établi 4 niveaux (faible, moyen, fort et très fort). En évaluant les écoulements enregistrés en 2012, 2015 et 2017, même si nous avons vu que ceux de 2017 ont été plus nombreux (41 en 2017, 12 en 2015 et 7 en 2012), nous avons observé que les écoulements forts et très forts ont été moins nombreux en proportion en 2017 (19,5 %) qu'en 2015 (50 %) et en 2012 (57,1 %). Donc, compte tenu de ce résultat, on peut affirmer la première hypothèse : « l'intensité des laves torrentielles de la ville de Chosica en 2017 a été moins importante qu'en 2012 et 2015 ».

De plus, nous avons analysé les données de précipitations en utilisant deux bases de données : celle des stations pluviométriques et celle d'un produit pluviométrique appelé PISCO (construit à partir d'estimations de pluie par satellite et d'interpolation de données observées au sol, sur une grille de 5x5 km). Dans un premier temps, PISCO nous a permis d'analyser la variabilité des pluies entre 1981 et 2016 dans 3 régions concernant notre zone d'étude : la ville de Chosica, le district de Lurigancho-Chosica et le bassin versant de la rivière Rímac (320,8 mm/an, 19,4 mm/an et 32,4 mm/an respectivement) ; et nous a permis de constater que des pluies importantes se produisent lors de forts événements El Niño, mais aussi en dehors de ces périodes. Cependant, après avoir comparé les données de pluie de la station pluviométrique de Chosica et les données de PISCO dans le pixel correspondant, nous avons observé que les données PISCO ne correspondent pas exactement aux données des stations. De ce fait, nous avons travaillé avec les données de pluie enregistrées entre 2012 et 2017 à la station à Chosica pour analyser leur lien avec l'intensité des écoulements torrentiels de 2012, 2015 et 2017 ; ceci afin de valider ou infirmer notre deuxième hypothèse : « Il y a une relation directe entre la quantité de précipitation et l'intensité des laves torrentielles des années 2012, 2015 et 2017 enregistrées dans la ville de Chosica ».

Les enregistrements de la station Chosica ont montré que la somme des pluies de janvier à avril (mois où les laves torrentielles se sont produites) est supérieure en 2017 ($P_{2012} = 62,6$ mm ; $P_{2015} = 61,2$ mm ; $P_{2017} = 107,3$ mm). Ceci nous a permis de comprendre pourquoi cette année-là il y a eu plus d'écoulements, ceux-ci étant liés à la quantité de pluie. De plus, nous avons obtenu une bonne corrélation ($R^2 = 0,791$) entre la quantité de pluie et les intensités globales (somme journalière des indicateurs d'intensité des écoulements) pour les 19 jours qui ont présenté des déclenchements. En considérant donc ces derniers résultats, nous pouvons valider notre deuxième hypothèse : « Il y a une relation directe entre la quantité de précipitation et l'intensité des laves torrentielles des années 2012, 2015 et 2017 enregistrées dans la ville de Chosica ».

Finalement, nous avons analysé les quantités de matériel retenu en 2017 par les 21 barrières flexibles installées dans les 8 torrents de Chosica en 2016. Précisons, qu'elles n'ont pas subi de dommages importants à cause de leur haute capacité de déformation qui a permis la dissipation de l'énergie de l'impact des flux des laves torrentielles. D'un côté, nous avons calculé le volume de l'ensemble du matériel retenu par torrent, afin de le lier avec ses caractéristiques géomorphologiques, ce qui nous a permis d'évaluer notre troisième hypothèse : « Le matériel retenu par les barrières flexibles en 2017, qui est un indicateur de la susceptibilité d'un torrent à produire des laves torrentielles plus ou moins intense, est proportionnel à la taille des bassins versants torrentiels de la ville de Chosica » ; et d'un autre côté, nous avons comparé la quantité de matériel retenu entre les barrières d'amont et d'aval pour chaque torrent, ce qui nous a permis d'évaluer la variation de l'intensité des flux des laves torrentielles après leur passage par une barrière, afin de valider ou infirmer notre quatrième hypothèse : « Les barrières en aval ont retenu moins de matériel que les barrières en amont pour chaque torrent de la ville de Chosica lors des laves torrentielles de 2017, ce qui montre que l'intensité des flux s'amenuise au fur et à mesure qu'il avance au travers des barrières ».

Les deux torrents qui ont retenu les volumes les plus importants sont les plus grands : Pedregal et Quirio (29,6 % et 27,0 % du volume total, respectivement, qui s'élève à 14837,5 m³). Cependant, ce qui attire notre attention est que dans la troisième position se trouve le torrent Carossio, qui, avec un bassin versant torrentiel 20 fois plus petit que celui de Pedregal et Quirio, a retenu 21,8 % du volume total. De plus, le rapport entre le volume retenu et la superficie du bassin versant torrentiel de Carossio est environ 15 fois plus

grand que ceux des 3 torrents où ont été retenus les volumes les plus importants (Pedregal, Quirio et La Ronda). Ceci est lié au fait que la pente moyenne de Carossio est plus élevée ($P_{\text{CAROSSIO}} = 40\%$; $P_{\text{PEDREGAL}} = 30\%$; $P_{\text{QUIRIO}} = 28\%$; $P_{\text{RONDA}} = 25\%$), ce qui facilite le transport du matériel sédimentaire vers l'aval. Ainsi, face à ces évidences, nous pouvons infirmer la troisième hypothèse : « Le matériel retenu par les barrières flexibles en 2017, qui est un indicateur de la susceptibilité d'un torrent à produire des laves torrentielles plus ou moins intense, est proportionnel à la taille des bassins versants torrentiels de la ville de Chosica », car il est aussi important de prendre en compte un autre facteur qu'est la pente.

La comparaison entre le matériel retenu entre les barrières en aval et en amont des torrents, dans 5 des 8 torrents (Quirio, Pedregal, La Libertad, Mariscal Castilla et La Ronda), nous a montré qu'il y a des barrières en aval qui ont retenu plus de matériel que celles qui se localisent en amont. Donc, avec cette information, nous pouvons infirmer la quatrième hypothèse : « Les barrières en aval ont retenu moins de matériel que les barrières en amont pour chaque torrent de la ville de Chosica lors de laves torrentielles de 2017, ce qui montre que l'intensité des flux s'amenuise au fur et à mesure qu'il avance au travers des barrières ». Ceci est lié à la contribution du matériel venant des affluents du torrent et de l'érosion du lit du torrent dans les zones en aval des barrières, comme cela s'est passé très probablement dans les 5 torrents susmentionnés. Et comme cela s'est passé aussi en aval de la dernière barrière, la plus proche des habitations dans les torrents Pedregal et Quirio ; en effet, des laves torrentielles de fortes intensités ont bien été enregistrées, même si les barrières ont retenu beaucoup de matériel sédimentaire.

En considérant donc les informations liées à nos 4 hypothèses, nous pouvons répondre à notre problématique en disant qu'il y a eu réellement une diminution des intensités des laves torrentielles en 2017 par rapport à celles de 2015 et 2012, et que cette situation n'a été pas produite par la présence d'une moindre quantité de pluie (au contraire, les pluies de 2017 ont été plus élevées qu'en 2012 et 2015), mais par l'apport des barrières flexibles qui ont retenu de grandes quantités de matériel sédimentaire, lesquelles ont varié au niveau des torrents selon leurs caractéristiques géomorphologiques comme les dimensions des bassins versants torrentiels et leurs pentes. Cependant, cette mesure structurelle ne semble pas être la solution parfaite, à cause de la contribution des affluents et de l'érosion du lit en aval des barrières ; en effet, à cause de ces phénomènes de nouveaux matériels sédimentaires

peuvent être mis en mouvement et produire des flux de fortes intensités vers les zones peuplées.

Mais, en conclusion, la mise en place des barrières flexibles a été très utile pour éviter des dommages à la population, de telle sorte qu'il serait bien de continuer à les entretenir, par exemple de les inspecter constamment pour renforcer les structures si nécessaire et de nettoyer le matériel retenu après chaque nouvel épisode de laves torrentielles. De plus, il serait important d'étudier le matériel retenu avant qu'il soit éliminé, car il peut permettre de réaliser des analyses qualitatives au niveau des torrents. Par ailleurs, à l'avenir il peut être intéressant de définir plus précisément l'intensité des flux en installant par exemple des caméras dans les bassins versant torrentiels.

Dans notre recherche, nous avons traité deux domaines d'étude : l'ingénierie civile (en ce qui concerne les barrières flexibles) et la géographie (en ce qui concerne la géomorphologie des torrents et l'étude des précipitations), montrant que dans le cas des risques naturels, les deux disciplines peuvent s'alimenter respectivement car grâce à la connaissance de l'espace naturel (géographie), il est possible de mieux concevoir des mesures structurelles pour réduire les impacts des aléas (ingénierie), les deux contribuant ainsi au bien-être de la société.

BIBLIOGRAPHIE

Articles et documents

1. Abad C., 2009. *Huaycos en 1987 en el distrito de Lurigancho – Chosica* (« Les laves torrentielles survenues en 1987 dans le district de Lurigancho-Chosica (Lima, Pérou) », en espagnol). *Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines - IFEA*, vol. 38, N° 3, p. 475-486.
2. Aceituno P., 1993. *El Niño*, l'oscillation australe, et ENSO: des noms qui prêtent à confusion pour une interaction complexe entre l'océan et l'atmosphère. *La Météorologie*, N° 3, p 44-48.
3. Alarcón F., 2016. *La importancia de la Carretera Central* (« L'importance de l'Autoroute Centrale », en espagnol). Ministère des Transports et des Communications du Pérou – MTC, Lima, 10 p.
4. American Meteorological Society - AMS, 2018. *Glossary of Meteorology*, <http://glossary.ametsoc.org/wiki/Pluviometer>. Consulté le 5 avril 2018.
5. Ancey C., 2001. Debris flows and related phenomena. *Geomorphological fluid mechanics*, Springer, Berlin, Heidelberg, p. 528-547.
6. Andina, le 28 octobre 2013. *Construyen diques en quebradas de Chosica para mitigar impacto de huaycos* (« Construction de digues sur les torrents à Chosica pour réduire l'impact des laves torrentielles », en espagnol), <http://andina.pe/agencia/noticia.aspx?id=480186>. Consulté le 22 mars 2018.
7. Autorité Nationale de l'Eau du Pérou - ANA, 2010. *Evaluación de los Recursos Hídricos en la Cuenca del Río Rímac* (« Évaluation des ressources hydriques dans le bassin versant de la rivière Rímac », en espagnol). Ministère de l'Agriculture du Pérou – MINAGRI, Lima, 225 p.
8. Autorité Nationale de l'Eau du Pérou - ANA, 2015a. *Actividades de limpieza y protección en quebradas por peligro inminente de inundaciones y huaycos en los departamentos de Lima, Piura, Tumbes, Lambayeque, La Libertad, Cajamarca y Cusco* (« Activités de nettoyage et protection dans les torrents face à la menace imminente d'inondation et de laves torrentielles dans les départements de Lima, Piura, Tumbes, Lambayeque, La Libertad, Cajamarca y Cusco », en espagnol). Ministère de l'Agriculture du Pérou – MINAGRI, Lima, 263 p.
9. Autorité Nationale de l'Eau du Pérou – ANA, 2015b. *Contrato de suministro, instalación y puesta en operación de 22 barreras dinámicas contra flujo de detritos* (« Contrat de livraison, installation et mise en œuvre de 22 barrières dynamiques face au flux de débris », en espagnol). Ministère de l'Agriculture du Pérou – MINAGRI, Lima, 9 p.
10. Autorité Nationale de l'Eau du Pérou – ANA, 2016. *ANA está culminando instalación de 22 barreras dinámicas en Lurigancho-Chosica* (« ANA achève l'installation de 22 barrières flexibles à Lurigancho-Chosica », en espagnol), <http://www.ana.gob.pe/video/ana-esta-culminando-instalacion-de-22-barreras-dinamicas-en-lurigancho-chosica>. Consulté le 18 avril 2018.
11. Autorité Nationale de l'Eau du Pérou – ANA, 2017. *Descolmatación y conservación de barreras dinámicas contra el flujo de detritos* (« Nettoyage et conservation des barrières flexibles face aux laves torrentielles », en espagnol). Lima, 21 p.
12. Autorité Nationale de l'Eau du Pérou – ANA, 2018a. *Calendario de los trabajos de limpieza de las barreras dinámicas 2018* (« Calendrier des travaux de nettoyage des barrières flexibles 2018 », en espagnol). Information du bureau de l'unité exécutive N° 2 du projet Modernisation de la Gestion des Ressources Hydriques de l'ANA.
13. Autorité Nationale de l'Eau du Pérou – ANA, 2018b. Enregistrement photographique des travaux de nettoyage et d'entretien des barrières flexibles 2018.
14. Bjercknes J. 1969. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Monthly Weather Review*, vol. 97, N° 3, p. 163–172.
15. Blijenberg H., 1998. Rolling stones? Triggering and frequency of hillslope debris flows in the Bachelard valley, southern French Alps. *Netherlands Geographical Studies*, Utrecht, 246, 240 p.
16. Bourrel L., Rau P., Dewitte B., Labat D., Lavado W., Coutaud A., Vera A., Alvarado A., Ordoñez J., 2015. Low-frequency modulation and trend of the relationship between ENSO and precipitation

- along the northern to centre Peruvian Pacific coast. *Hydrological Processes*, vol. 29, N° 6, p. 1252–1266.
17. Brunet-Moret Y., 1979. Homogénéisation des précipitations. *Cahiers Orstom, Série Hydrologie*, Paris, vol. 16, N° 3 et 4, p. 147–170.
 18. Centre d'Opérations de Secours National du Pérou de l'Institut National de Défense Civile du Pérou – COEN-INDECI, 2015. *Huaycos afectan el distrito de Lurigancho Chosica - Lima Metropolitana* (« Les laves torrentielles affectent le district de Lurigancho Chosica – Lima Métropolitaine », en espagnol). Institut National de Défense Civile du Pérou - INDECI, Lima, Rapport Technique N°581 – 08/05/2015 / COEN-INDECI, 29 p.
 19. Centre d'études et de prévention de catastrophes – PREDES, 2015. *Huaycos en Chosica* (« Laves torrentielles à Chosica », en espagnol). Lima, Rapport Spécial, 19 p.
 20. Delecluse P., 1999. « *El Niño* et sa prévision », Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science, vol. 328, N° 4, p. 281-288.
 21. Dewitte O., 2001. Le point sur les phénomènes *El Niño*, *La Niña* et de l'Oscillation Australe. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, vol. 40, N° 1, p. 15-32.
 22. Earth System Research Laboratory of the National Oceanic and Atmospheric Administration - ESRL-NOAA, 2018. Climate Indices: Monthly Atmospheric and Ocean Time Series, <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>. Consulté le 12 avril 2018.
 23. Étude nationale du phénomène *El Niño* au Pérou – ENFEN, 2017. *Niño Costero 2017*. Rapport Technique extraordinaire N° 001-2017/ENFEN, Lima, 31 p.
 24. Funk C., Peterson P., Landsfeld M., Pedreros D., Verdin J., Shukla S., Husak G., Rowland J., Harrison L., Hoell A., Michaelsen J., 2015. The climate hazards infrared precipitation with stations – a new environmental record for monitoring extremes. *Climate Hazards Group*, 21 p. <http://dx.doi.org/10.15780/G2RP4Q>.
 25. Garreaud R., 2018. A plausible atmospheric trigger for the 2017 coastal *El Niño*. *International Journal of Climatology*, vol. 38, issue S1, p. 1296-1302. <https://doi.org/10.1002/joc.5426>.
 26. Geobruigg, 2018a. Flexible ring net barriers for debris flow protection: The economic solution, <https://www.geobruigg.com/>. Consulté le 18 avril 2018.
 27. Geobruigg, 2018b. Des barrières à base de filets à anneaux en fils d'acier ultra-résistants - la solution économique de protection contre les laves torrentielles, <https://www.geobruigg.com/>. Consulté le 18 avril 2018.
 28. Geobruigg, 2018c. Ring net made of high-tensile steel wire ROCCO – Technical data, <https://www.geobruigg.com/>. Consulté le 18 avril 2018.
 29. GOOGLE EARTH, 2018, <https://www.google.com/earth/>. Consulté le 7 mars 2018.
 30. Institut de Géophysique du Pérou – IGP, 2018a. *Índices de monitoreo del clima* (« Indices de surveillance du climat », en espagnol), <http://www.met.igp.gob.pe/variabclim/indices.html>. Consulté le 10 avril 2018.
 31. Institut de Géophysique du Pérou – IGP, 2018b. *Primer radar meteorológico de lluvias llega al Perú* (« Le premier radar météorologique pour les pluies arrive au Pérou », en espagnol), <http://scah.igp.gob.pe/primer-radar-meteorologico-lluvias-llega-peru>. Consulté le 10 avril 2018.
 32. Institut National de Statistique et d'Informatique du Pérou – INEI, 2008. *Perfil Sociodemográfico de la Provincia de Lima* (« Portrait sociodémographique de la Province de Lima », en espagnol). Lima, 527 p.
 33. Institut National de Statistique et d'Informatique du Pérou – INEI, 2009a. *Perú: Estimaciones y Proyecciones de Población por Sexo, según Departamento, Provincia y Distrito, 2000-2015* (« Pérou : Estimations et Projections de la Population par Sexe, selon Département, Province et District, 2000-2015 », en espagnol). Lima, Bulletin Spécial N° 18, 394 p.
 34. Institut National de Statistique et d'Informatique du Pérou – INEI, 2009b. *Perú: Estimaciones y Proyecciones de Población Urbana y Rural por Sexo y Edades Quinquenales, según Departamento, 2000-2015* (« Pérou : Estimations et Projections de la Population Urbaine et Rurale par Sexe et Ages Quinquennaux, par Département, 2000-2015 », en espagnol). Lima, *Bulletin Spécial N°19*, 298 p.

35. Institut National de Statistique et d'Informatique du Pérou – INEI, 2015. *Mapa de Pobreza Provincial y Distrital 2013* (« Carte de la Pauvreté Provinciale et des Districts 2013 », en espagnol). Lima, 168 p.
36. Lavado W., Espinoza J., 2014. *Impactos de El Niño y La Niña en las lluvias del Perú (1965-2007)* (« Impact de *El Niño* et *La Niña* sur les pluies au Pérou (1965-2007) », en espagnol), *Revista Brasileira de Meteorologia*, São Paulo, vol. 29, N°2, p. 171-182.
37. Lavado W., Fernandez C., Vega F., Caycho T., Endara S., Huerta A., Obando O., 2015. PISCO: Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations. Precipitación v1.0. Service National de Météorologie et d'Hydrologie du Pérou – SENAMHI, 4 p.
38. Lavado W., Ronchail J., Labat D., Espinoza J., Guyot J., 2012. Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969–2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages. *Hydrological Sciences Journal*, 18 p. DOI:10.1080/02626667.2012.672985
39. Macroconsult, 2017. Peruvian economic losses during *El Niño* 2017. Technical Report, Macroconsult, Miraflores, Peru, <http://grupomacro.pe/2017/03/24/danos-de-el-nino-us3-124-millones-hasta-ahora-macroconsult/>. Consulté le 30 mars 2018.
40. Mairie de Lurigancho-Chosica, 2013. *Plan de Desarrollo Concertado Distrital de Lurigancho Chosica 2013-2025* (« Plan de Développement du District de Lurigancho Chosica 2013-2025 », en espagnol). Lima, 116 p.
41. Mairie de Lurigancho-Chosica, 2016. *Gestión de riesgo de desastres 2016* (« Gestion du risque de catastrophe 2016 », en espagnol) [Diapositives PowerPoint], Centre d'Opérations de Secours du district de Lurigancho-Chosica – COE-CHOSICA, Lima, exposé en mars 2016.
42. Mcphaden M., Zebiak S., Glantz M., 2006. ENSO as an integrating concept in earth science. *Science*, vol. 314, No. 5806, p. 1740-1745.
43. Mejía A., 2017. Laves torrentielles à Lurigancho-Chosica (Lima – Pérou) : l'évolution du risque et des mesures de gestion. Mémoire de la première année du master Géographie et Sciences de Territoires, Université Paris-Diderot, Paris, 146 p.
44. Meunier M., 1991. Éléments d'Hydraulique Torrentielle. *Études Montagne*, N°1, Editions Cemagref, Antony, 278 p.
45. National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA, 2018. Equatorial Pacific Sea Surface Temperatures, <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>. Consulté le 2 avril 2018.
46. Nuñez S., Villacorta S., Huarez C., 2015. *Evaluación geodinámica de los flujos de detritos del 23/03/2015 entre las quebradas Rayos de Sol y Quirio (Chosica) y Cashahuacra (Santa Eulalia)* (« Evaluation géodynamique des flux de débris du 23/03/2015 entre les torrents Rayos del Sol et Quirio (Chosica) et Cashahuacra (Santa Eulalia) », en espagnol). Institut Géologique, Minier et Métallurgique du Pérou - INGEMMET, Lima, Rapport Technique N° A 6680, 65 p.
47. Palacios O., Caldas J., Vela Ch., 1992. Geología de los Cuadrángulos de Lima, Lurín, Chancay y Chosica (« Géologie des Quadrants de Lima, Lurín, Chancay et Chosica », en espagnol). Institut Géologique, Minier et Métallurgique du Pérou - INGEMMET, Lima, *Bulletin N° 43*, Série A, 163 p.
48. Peru21, le 23 janvier 2013. *Chosica: Reforzarán diques para proteger viviendas de posible huaico* (« Chosica : Les digues seront renforcées pour protéger les logements face à de possibles laves torrentielles », en espagnol), <http://peru21.pe/actualidad/chosica-reforzaran-diques-proteger-viviendas-posible-huaico-2113864>. Consulté le 22 mars 2018.
49. Remaître A., 2006. Morphologie et dynamique des laves torrentielles : Applications aux torrents des Terres Noires du bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud). Thèse de doctorat en Géographie physique, humaine, économique et régionale, Caen, Université de Caen Basse-Normandie, 487 p.
50. Sanabria J., Bourrel L., Dewitte B., Frappart F., Rau P., Solis O., Labat D., 2018. Rainfall along the coast of Peru during strong *El Niño* events. *International Journal of Climatology*, vol 38, N° 4, p. 1737-1747.
51. Segerer C., Villodas R., 2006. *Las precipitaciones* (« Les précipitations », en espagnol). Faculté de génie civil de l'Université National de Cuyo, Mendoza (Argentine), 26 p.
52. Service National de Météorologie et d'Hydrologie du Pérou – SENAMHI, 2018a. Base de données des enregistrements de pluie journalière des stations météorologiques du SENAMHI localisées dans le bassin versant de la rivière Rímac entre 2012 et 2017.

53. Service National de Météorologie et d'Hydrologie du Pérou – SENAMHI, 2018b. Base de données PISCO-SENAMHI (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations) entre 1981 et 2017.
54. Sophimania, le 16 mars 2017. *¿Es el Niño, la Niña o el Cambio Climático lo que afecta al Perú? Aquí la respuesta* (« Est-ce que c'est *El Niño*, *La Niña* ou le changement climatique qui affecte au Pérou ? Voilà la réponse », en espagnol), <http://www.sophimania.pe/ciencia-peru/peruanxs-destacadxs/es-el-nino-la-nina-o-el-cambio-climatico-lo-que-afecta-al-pera-aqui-la-respuesta/>. Consulté le 5 avril 2017.
55. Sulca J., Takahashi K., Espinoza J. C., Vuille, M., Lavado W., 2018. Impacts of different ENSO flavors and tropical Pacific convection variability (ITCZ, SPCZ) on austral summer rainfall in South America, with a focus on Peru. *International Journal of Climatology*, vol. 38, N° 1, p. 420-435.
56. Système d'Information Nationale pour la Réponse et la Réhabilitation de l'Institut National de Défense Civile du Pérou – SINPAD-INDECI, 2018, <http://sinpad.indeci.gob.pe/PortalSINPAD/>. Consulté le 22 mars 2018.
57. Takahashi K., Aliaga V., Ávalos G., Bouchon M., Castro A., Cruzado L., Dewitte B., Gutiérrez D., Lavado W., Marengo J., Martínez A.G., Mosquera-Vásquez K., Quispe N., 2018. The 2017 coastal El Niño off Peru. *Soumis à Bulletin of the American Meteorological Society*, 6 p.
58. Takahashi K., 2017. Fenómeno El Niño: “Global” vs “Costero” (« Phénomène *El Niño*: “Global vs “Costero” », en espagnol). *Boletín Técnico El Niño*, Institut de Géophysique du Pérou - IGP, Lima, vol. 4, N° 4, p. 4-7.
59. Takahashi K., Martínez A., 2017. The very strong coastal El Niño in 1925 in the far-eastern Pacific. *Climate Dynamics*, p. 1-27. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3702-1>.
60. Takahashi K., Montecinos A., Goubanova K., Dewitte B., 2011. ENSO regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki *El Niño*, *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, L10704, 5 p. <https://doi.org/10.1029/2011GL047364>.
61. Tumialán A., 2015. *Rasgos geológicos del río Rímac, abastecimiento de agua en su cono de deyección* (« Caractéristiques géologiques de la rivière Rímac, approvisionnement en eau dans son cône de déjection », en espagnol). *Revue de Sciences*, vol. 11, p. 120-130.
62. United States Geological Survey - USGS, 2018. Cycle de l'eau, <https://water.usgs.gov/edu/watercyclefrench.html#precipitation>. Consulté le 5 avril 2018.
63. Varnes D.J, 1978. Slope movement types and processes. Transportation Research Board – National Research Council, Special Report 176, *National Academy Press*, New York, p. 1-13.
64. Volkwein A., 2014. Flexible debris flow barriers – Design and application. WSL Berichte 18, Birmensdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL. 29 p.
65. Wendeler C, 2016. Debris-Flow Protection Systems for Mountain Torrents - Basic principles for planning and calculation of flexible barriers. WSL Berichte 44, Birmensdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL. 267 p.
66. WorldClimate, 2018. Climate Data for 12°S 77°W (Lima-Callao / International Airport), <http://www.worldclimate.com/cgi-bin/data.pl?ref=S12W077+1102+84628W>. Consulté le 15 mars 2018.
67. Zambrano E., 1986. *El fenómeno de El Niño y la Oscilación Sur (ENSO)* (« Le phénomène *El Niño* et l'Oscillation Australe (ENSO) », en espagnol). *Acte Océanographique du Pacifique*, vol. 3, N° 1, p. 195-203.

Entretiens

1. Communication personnelle le 22 février 2017, du chef du Centre d'Opérations de Secours Chosica – COE-CHOSICA, Monsieur José Martinez.
2. Communication personnelle le 12 février 2018, d'un spécialiste de la Direction de Planification et Développement de Ressources Hydriques de l'ANA, Monsieur Juan Rodriguez.
3. Communication personnelle le 19 février 2018, d'un des ingénieurs responsables des travaux de nettoyage des Barrières Dynamiques de l'ANA, Monsieur Moisés Narvaez
4. Communication personnelle le 19 février 2018, du contrôleur général des travaux de nettoyage des Barrières Dynamiques de l'ANA, Monsieur Felix Caubi.
5. Communication personnelle le 20 février 2018, du directeur de la sous-direction de Sciences de la Terre Solide de l'Institut de Géophysique du Pérou - IGP, Monsieur Juan Gomez.
6. Communication personnelle le 23 février 2018, d'une leader du quartier San Antonio - 2ème Zone – torrent Pedregal, Madame Victoria Prudencio
7. Communication personnelle le 23 février 2018, du chef du Centre d'Opérations de Secours Chosica – COE-CHOSICA, Monsieur José Martinez.
8. Communication personnelle le 26 février 2018, d'une spécialiste de la sous-direction d'Études et de Recherches Hydrologiques du SENAMHI, Madame Sofía Endara.
9. Communication personnelle le 28 février 2018, d'un agent de sécurité de la mairie de Santa Eulalia, Monsieur Antonio Huaynalaya.
10. Communication personnelle le 28 février 2018, d'un leader du quartier Nicolás del Piérola – torrent Quirio, Monsieur Orlando Jimenez
11. Communication personnelle le 28 février 2018, du président du comité directeur des habitants du quartier Buenos Aires – torrent Carossio, Monsieur Jerónimo Pareja.

ANNEXES

Annexe 1 : Récit détaillé des dégâts lors des différentes laves torrentielles De 2012, 2015 et 2017 (relative au chapitre I)

Annexe 2 : Description du phénomène « *El Niño* - Southern Oscillation (ENSO) » (relative au chapitre II)

Annexe 3 : Comparaison des enregistrements journaliers du produit PISCO et des stations pluviométriques pour des régions définies dans le bassin versant de la rivière Rímac (2012-2016) (relative au chapitre II)

Annexe 4 : Description géomorphologique détaillée de 4 torrents de la ville de Chosica (Quirio, Pedregal, Carossio et Corrales) (relative au chapitre III)

ANNEXE 1

RÉCIT DÉTAILLÉ DES DÉGÂTS LORS DES DIFFÉRENTES LAVES TORRENTIELLES DE 2012, 2015 ET 2017

(RELATIVE AU CHAPITRE I)

RÉCIT DÉTAILLÉ DES DÉGÂTS LORS DES DIFFÉRENTES LAVES TORRENTIELLES DE 2012, 2015 ET 2017

A. RECIT DETAILLE DES DÉGÂTS LORS DES LAVES TORRENTIELLES DU 05 AVRIL 2012

Torrents déclenchés (décrits ci-dessous) : Quirio, Pedregal, Carossio, La Libertad (rive droite) ; Santo Domingo, La Ronda, Mariscal Castilla (rive gauche)

Sur la rive droite de la rivière Rimac, autour des torrents Quirio et Pedregal il n'y pas eu de dommages importants, seulement quelques faibles inondations de certains logements et rues. Près du torrent Carossio, les dommages ont été un peu plus forts pour les logements qui se trouvent dans les parties les plus hautes (sur la partie centrale du bassin versant torrentiel), avec la présence de blocs de grande dimension sur le chenal du torrent. Par ailleurs, dans le torrent La Libertad, la lave torrentielle a produit des dommages considérables dans quelques logements et la chute de certains poteaux électriques (Guadalupe et Carrillo, 2012) (figure A1.1).



Figure A1.1. Laves torrentielles en 2012 sur la rive droite de la rivière Rimac,
(A) Dans le torrent Carossio
(B) Dans le torrent La Libertad

SOURCE : Guadalupe et Carrillo, 2012

Sur la rive gauche, dans le torrent Santo Domingo, le flux a produit des dégâts mineurs seulement dans quelques logements. Dans le torrent La Ronda, la lave torrentielle a balayé la plupart des logements en condition précaires qui avaient été installés récemment dans les

parties les plus hautes (sur la partie centrale du bassin versant torrentiel), et elle a produit aussi des dégâts mais légers sur les logements situés en aval. Cependant, les alentours du torrent Mariscal Castilla ont été les plus affectés. Là, le flux a débordé du chenal du torrent dans la partie centrale et inférieure du bassin versant torrentiel, dont la largeur avait été réduite pour favoriser l'installation de quelques quartiers (par exemple : San Juan de Bellavista et Mariscal Ramón Castilla), et a produit de sévères dégâts aux logements de ces zones. De plus, ce chenal réduit a contribué à augmenter la vitesse et l'intensité du flux vers l'aval, où se trouvent d'autres quartiers comme celui appelé Pablo Patrón, dont les logements ont été affectés jusqu'à leur deuxième étage (Ibid) (figure A1.2).



Figure A1.2. Laves torrentielles en 2012 sur la rive gauche de la rivière Rimac,
 (A) Dans le torrent La Ronda : des logements précaires détruits
 (B) Dans le torrent Mariscal Castilla : un logement enseveli du quartier Pablo Patrón, seul le troisième étage apparaît dans la figure

SOURCE : Guadalupe et Carrillo, 2012

B. RÉCIT DÉTAILLÉ DES DÉGÂTS LORS DES LAVES TORRENTIELLES DU 23 MARS 2015

Torrents déclenchés (décrits ci-dessous) : Pedregal, Carossio, Corrales

Dans le torrent Pedregal, à cause d'une négligence et de leur curiosité (observer de près l'événement), deux personnes sont mortes (communication personnelle le 23 février 2018, du chef du Centre d'Opérations de Secours Chosica – COE-CHOSICA, Monsieur José Martinez). Par ailleurs, un débordement de la rivière Rimac a été enregistré dans le quartier « 3 Octobre », qui se trouve en face de ce torrent (en traversant la rivière, sur la rive

gauche). Ceci s'est produit car la lave torrentielle du torrent Pedregal est arrivée à l'embouchure si fortement qu'elle a cassé la digue qui protégeait ce quartier d'un débordement de la rivière, et, en conséquence le flux s'est déplacé en entraînant des dommages aux logements (PREDES, 2015).

Dans le cas du torrent Carossio, au moment du déclenchement, il y avait une pelleteuse dans la partie centrale du bassin versant torrentiel (sur le chenal du torrent), qui faisait des travaux de nettoyage des débris des anciennes laves torrentielles. Cette machine, entraînée par les laves torrentielles, s'est déplacée le long du chenal avec des blocs et de la boue, en abîmant des logements, des poteaux électriques et le système de distribution de l'eau et d'égout (figure A1.3A). Même si les dommages ont été importants (en plus du fait que la population a perdu les services d'électricité et de connexion à l'eau potable pendant 5 mois à cause de cet événement), aucun décès n'a été enregistré (communication personnelle le 28 février 2018, du président du comité directeur des habitants du quartier Buenos Aires – torrent Carossio, Monsieur Jerónimo Pareja).

Dans le torrent Corrales (Rayos de Sol), une partie de la lave torrentielle, au lieu de se déplacer dans son lit, a fait une embardée par une route, causant des préjudices au quartier La Trinchera (figure A1.3B). Par ailleurs, le réseau central de distribution d'eau potable de la zone nord sur la rive droite de la rivière Rímac a été cassé par l'impact de la lave torrentielle à Corrales, laissant sans eau les logements du quartier La Trinchera et ceux des quartiers proches. De plus, les systèmes d'égouts ont débordé et ont affecté tous ces quartiers (PREDES, 2015), jusqu'au 8 avril 2015 où tous les systèmes (d'eau, d'égouts et d'électricité) ont été rétablis, c'est-à-dire presque un mois après l'évènement (COEN-INDECI, 2015). Comme le torrent Corrales est proche du district voisin de Santa Eulalia (qui a aussi été affecté par les laves torrentielles), des agents de sécurité de ce district ont aidé à porter assistance aux victimes, et finalement il y a eu 7 décès. Parmi eux, des enfants : deux frères qui ont été trouvés dans les bras l'un de l'autre dedans les toilettes de leur logement inondé ; et la fille du maire du district de Cocachacra (province de Huarochiri), qui après avoir attendu l'ouverture de l'Autoroute Centrale (fermé par le déclenchement d'un torrent proche) dans un bus, a décidé de se déplacer à pied, et a été finalement balayée par la lave torrentielle de Corrales (communication personnelle le 28 février 2018, d'un agent de sécurité de la mairie de Santa Eulalia, Monsieur Antonio Huaynalaya).



Figure A1.3. Laves torrentielles en 2015,

(A) Dans le torrent Carossio : Logements endommagés par le déplacement de grands blocs sur le chenal du torrent

(B) Dans le torrent Corrales : Véhicules de grande dimension coincés par les blocs dans le quartier Trinchera

SOURCE : COE-CHOSICA, 2015

C. RÉCIT DÉTAILLÉ DES DÉGÂTS LORS DES LAVES TORRENTIELLES DU 16 MARS 2017

Torrents déclenchés (décrits ci-dessous) : Pedregal, Quirio

Le 16 mars, qui a été considéré comme le jour le plus catastrophique de l'année 2017 à Chosica, les dommages se sont localisés surtout dans les torrents San Antonio (Pedregal) et Quirio (communication personnelle le 23 février 2018, du chef du COE-CHOSICA, Monsieur José Martinez). Dans le torrent Pedregal, le flux s'est déplacé non seulement le long du lit du torrent, mais aussi par une route (Tupac Amaru) construite parallèlement au torrent il y a 7 ans. Selon les habitants du quartier San Antonio - 2ème Zone (situé dans ce torrent), le flux sur cette route « était comme une rivière ». Il a endommagé la route, une petite tranchée (type de canal pour conduire l'eau des affluents vers le lit des torrents) et il y a eu de faibles inondations dans quelques logements (figure A1.4A) (communication personnelle le 23 février 2018, d'un leader du quartier San Antonio - 2ème Zone – torrent Pedregal, Madame Victoria Prudencio).

La lave torrentielle à Quirio a produit des dégâts dans les logements qui se localisent aux côtés du lit du torrent. Par exemple, dans le quartier Nicolás del Piérola, le flux a balayé

presque la moitié des maisons et même une soupe populaire entière (communication personnelle le 28 février 2018, d'un leader du quartier Nicolás del Piérola – torrent Quirio, Monsieur Orlando Jimenez) (figure A1.4B).



Figure A1.4. Laves torrentielles en 2017,

(A) Dans le torrent Pedregal : Dommages et accumulation de débris dans la route Tupac Amaru (parallèle au lit du torrent dans le quartier San Antonio - 2ème Zone)

(B) Dans le torrent Quirio : Logements détruits et endommagés aux côtés du lit du torrent dans le quartier Nicolás del Piérola

SOURCE : Elaboration personnelle, 2018

ANNEXE 2

DESCRIPTION DU PHÉNOMÈNE

« EL NIÑO - SOUTHERN OSCILLATION (ENSO) »

(RELATIVE AU CHAPITRE II)

DESCRIPTION DU PHÉNOMÈNE

« EL NIÑO - SOUTHERN OSCILLATION (ENSO) »

Extrait du document « Laves torrentielles à Lurigancho-Chosica (Lima – Pérou) :

L'évolution du risque et des mesures de gestion » (Mejía, 2017)

El Niño (« l'enfant Jésus », en espagnol) est un terme utilisé depuis longtemps pour désigner le courant océanique chaud qui apparaît presque tous les ans le long des côtes du Sud de l'Équateur et du Nord du Pérou aux environs de Noël (Aceituno, 1993). Son occurrence est annuelle, mais les plus intenses, qui affectent le climat d'une grande partie du globe, se produisent tous les deux à sept ans (McPhaden et al., 2006). D'un autre côté, en 1932, le terme *Southern Oscillation* - SO (traduit par « Oscillation Australe ») a été proposé pour désigner un phénomène qui produit une oscillation de pression atmosphérique entre l'Est et l'Ouest de l'océan Pacifique tropical (Aceituno, 1993).

Walker en 1923 a calculé un indice appelé *Southern Oscillation Index* – SOI (traduit par « Indice d'Oscillation Australe – IOA ») qui est la différence normalisée de la pression atmosphérique au niveau de la mer mesurée à Papeete (Tahiti) et à Darwin (Australie). Une anomalie de type *El Niño* se met en place quand la différence devient négative (alors qu'elle est habituellement positive) causée par une faiblesse des vents alizés, lesquels soufflent de l'Est vers l'Ouest (Dewitte, 2001). Cette anomalie ne se passe pas seulement dans l'océan Pacifique, mais aussi tout au long des tropiques, via la circulation de Walker (Di Liberto, 2014) (figure A2.1).

C'est en 1960 que les théories expliquent et démontrent une relation entre *El Niño* et l'Oscillation Australe (Zambrano, 1986). C'est-à-dire, qu'*El Niño* se produit quand le SOI devient négatif, montrant donc une relation entre l'océan et l'atmosphère (Aceituno, 1993) (figure A2.1).

À partir de 1982, ce couplage océan-atmosphère est appelé ENSO (*El Niño – Southern Oscillation*); les études le concernant considèrent l'interaction de ces deux phénomènes (Dewitte, 2001). Cependant, tout ce phénomène est plus connu sous le nom d'*El Niño*, principalement dans les médias et voire dans certains domaines scientifiques, puisque un consensus sur les termes n'a pas été établi (Aceituno, 1993).

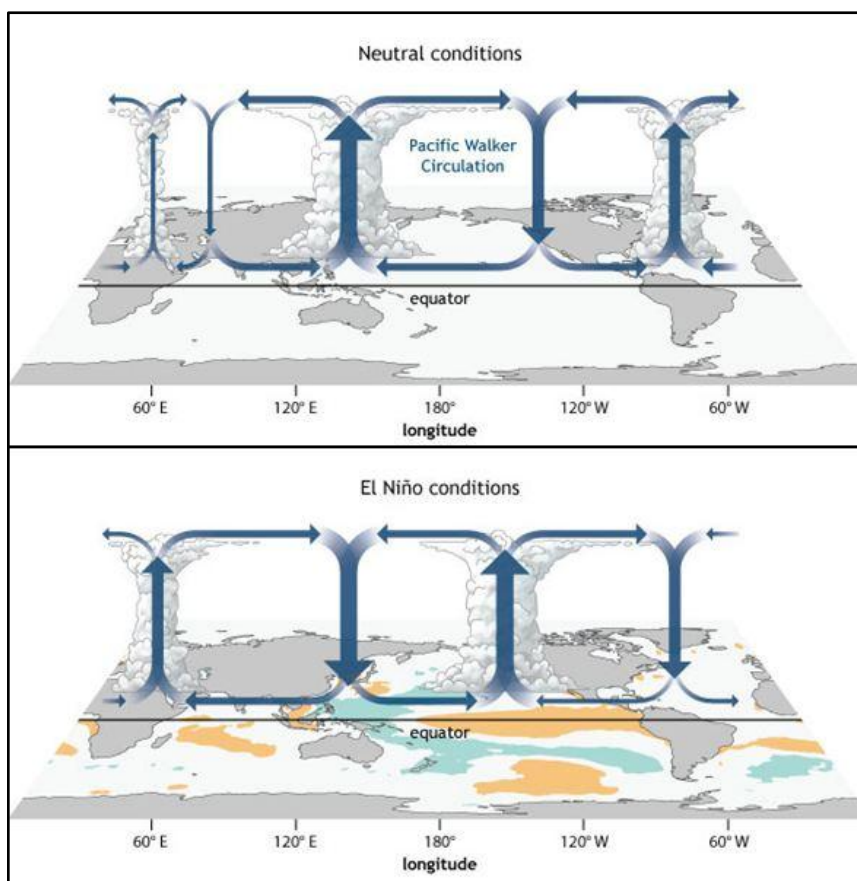


Figure A2.1. Circulation de Walker le long de l'Équateur pour des conditions normales et pour des conditions *El Niño*

SOURCE : Di Liberto, 2014

Donc, dans son état normal, la température de l'océan Pacifique le long de l'Équateur est chaude à l'ouest et froide à l'est. Cette dernière zone est froide à cause de la présence du courant froid de Humboldt qui vient du Sud et de l'upwelling, alors que le courant équatorial sud emporte ces eaux froides de l'est à l'ouest, qui s'échauffent par l'interaction avec l'atmosphère pendant ce trajet et s'accumulent à l'ouest. Tout ce système de courants est déplacé par les vents alizés du sud-est (Zambrano, 1986). La résultante est la circulation de Walker avec ascendance à l'ouest au-dessus des eaux chaudes et subsidence à l'est au-dessus des eaux froides. Dans l'océan, la thermocline (mince couche qui sépare les eaux chaudes et froides dans les océans) s'abaisse vers l'ouest (Dewitte, 2001) (figure A2.2).

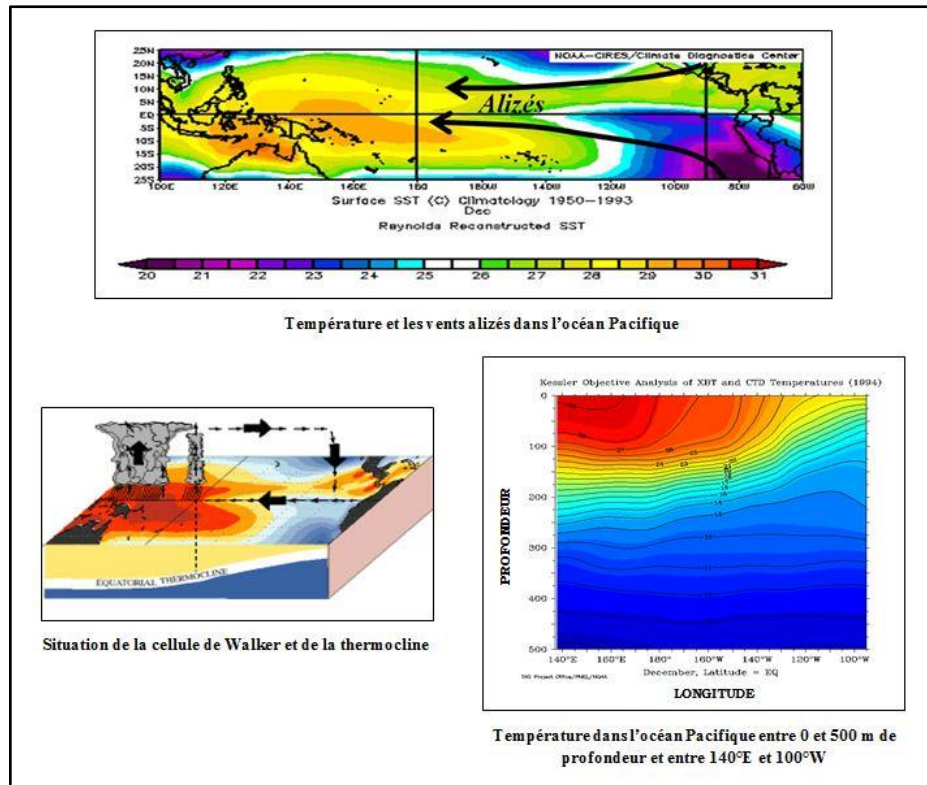


Figure A2.2. Conditions normales de l'océan et de l'atmosphère dans l'océan Pacifique (décembre-février)

SOURCE : NOAA
Extrait de Ronchail, 2017

Précisément, le phénomène ENSO serait la réponse dynamique de l'océan quand il existe un affaiblissement des vents alizés dans le Pacifique équatorial central (Zambrano, 1986). Cette situation a pour conséquence un approfondissement à l'est de la thermocline qui devient alors horizontale (Dewitte, 2001), en produisant des ondes de Kelvin qui se propagent vers l'est (Zambrano, 1986). Avec l'arrivée de ces ondes de Kelvin, la température de la surface de la mer sur le Pacifique oriental augmente, et apparaît donc la situation anormale : des eaux plus chaudes que la normale à l'Est et des eaux plus froides que la normale à l'Ouest (Ibid) (figure A2.3).

À cause des températures océaniques plus basses que d'habitude, l'air s'affaisse dans la région occidentale de l'océan Pacifique, en favorisant des conditions de sécheresse et des incendies de forêts en Indonésie et dans le sud-est de l'Australie ; à l'est au contraire, les températures océaniques plus élevées qu'en moyenne déstabilisent l'atmosphère où les mouvements ascendants favorisent des précipitations fortes et des inondations sur les côtes d'Amérique du Sud tropicale (Zambrano, 1986). En plus, des effets de ce phénomène ont

été identifiés en Afrique, en Asie et en Europe, car ENSO a des répercussions sur le climat mondial, via des téléconnexions liées à la circulation de Walker (Fig A2.1) (Dewitte, 2001).

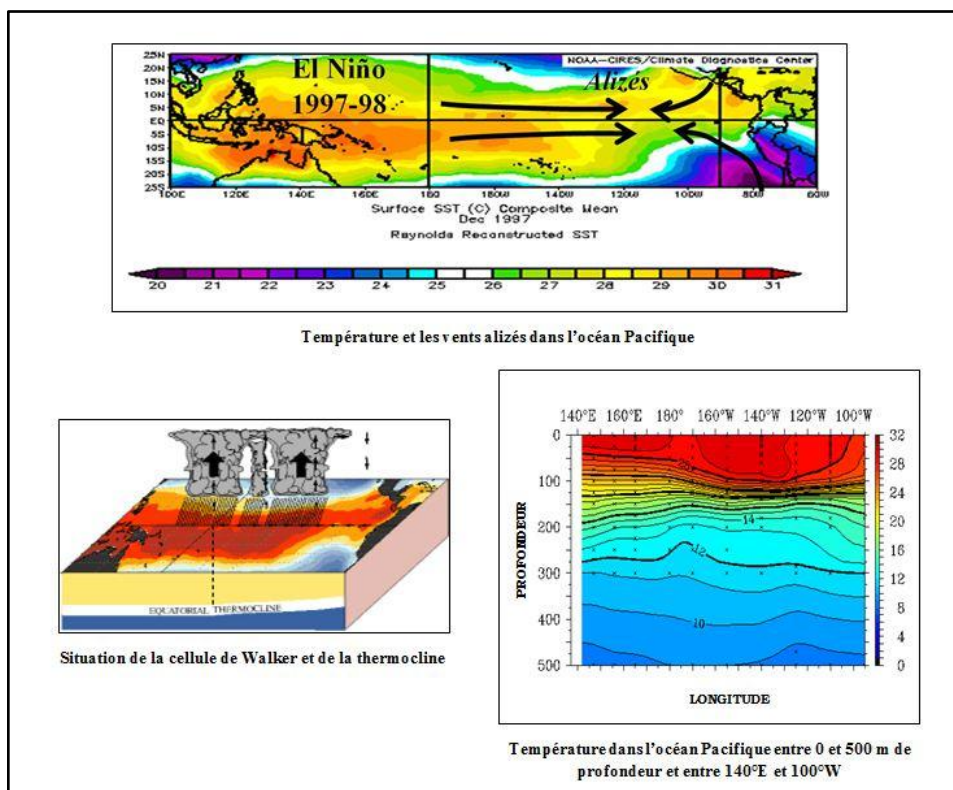


Figure A2.3. Conditions de l'océan et de l'atmosphère dans l'océan Pacifique pendant *El Niño* (décembre-février 1997-1998)

SOURCE : NOAA
Extrait de Ronchail, 2017

Grâce à la technologie (des observations satellitaires et des modèles mathématiques avancés) et à l'expérience acquise à propos des épisodes étudiés, depuis 2000, il est possible de prédire ce phénomène 6 à 9 mois à l'avance (Dewitte, 2001).

ANNEXE 3

COMPARAISON DES ENREGISTREMENTS JOURNALIERS DU PRODUIT PISCO ET DES STATIONS PLUVIOMÉTRIQUES POUR DES RÉGIONS DÉFINIES DANS LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE RIMAC (2012-2016)

(RELATIVE AU CHAPITRE II)

COMPARAISON DES ENREGISTREMENTS JOURNALIERS DU PRODUIT PISCO ET DES STATIONS PLUVIOMÉTRIQUES POUR DES RÉGIONS DÉFINIES DANS LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE RIMAC (2012-2016)

Dans cette section, nous allons faire la comparaison entre les données du produit PISCO et celles des stations pluviométriques, qui concernent les enregistrements de pluie journalière mesurées entre 2012 et 2016 dans 16 stations pluviométriques localisées dans le bassin versant de la rivière Rímac, et les enregistrements PISCO dans les pixels où se trouvent ces stations.

Afin que les résultats ne soient pas affectés par des données manquantes dans les enregistrements des stations¹⁹, et aussi pour éviter que les données PISCO ne soient pas altérées par leur résolution (pixels de 5 km), nous faisons la comparaison entre les moyennes des enregistrements de quelques régions. Ces régions, qu'on appellera « sous-bassins versant définis (SBVD) », sont au nombre de 5, constitués de quelques sous-bassins versants de la rivière Rímac ou de l'union de certains d'entre eux qui ont des conditions géographiques similaires. Le tableau A3.1 présente la dénomination de ces régions, les sous-bassins versants de la rivière Rímac qu'elles incluent et les stations qui se trouvent dans chaque région. Les valeurs de ces stations et celles des pixels PISCO les plus proches de ces stations sont moyennées et comparées. La localisation des stations et des sous-bassins versants apparaît dans la figure 17 (sous-chapitre 2.2) ; la localisation des sous-bassins versant est plus claire dans la figure 2 sous-chapitre 1.1).

¹⁹ Parmi les 33626 valeurs des 16 stations entre 2012 et 2017, 1446 ont la dénomination NA qui signifie *not available* (traduit par « non disponible ») et correspondent à des données manquantes (4,3% du total). Cependant, 1157 NA (3,4%) correspondent à des enregistrements de la station # 15, où normalement la valeur est 0, raison pour laquelle la présence de ces NA ne devrait pas produire pas de grandes anomalies.

Tableau A3.1. Sous-bassins versants définis (SBVD), sous-bassins versants de la rivière Rímac et stations pluviométriques qu'ils comprennent

SOUS-BASSINS VERSANTS DÉFINIS (SBVD)	SOUS-BASSINS VERSANTS DE LA RIVIÈRE RÍMAC	N° STATION 1/
SBVD-1	Baja río Rímac	15, 16
SBVD-2	Jicamarca - Santa Eulalia	1, 4, 9
SBVD-3	Río Santa Eulalia	6, 7, 8, 10, 13
SBVD-4	Santa Eulalia - Parac, Parac - Alto río Rímac, Quebrada Parac	2, 3, 11, 14
SBVD-5	Alta río Rímac Río Blanco	5, 12

1/ N° station montrés dans la figure 17

SOURCE : SENAMHI, 2018a ; SENAMHI, 2018b

Élaboration personnelle

Pour ces 5 régions, nous calculons la quantité de pluie journalière entre 2012 et 2016 observées dans les stations pluviométriques et calculées dans le cadre du projet PISCO (figure A3.1). Nous pouvons observer la différence entre les quantités de précipitations observées et calculées dans les 5 SBVD. Au premier abord, les quantités des deux premiers SBVD (SBVD-1 et SBVD-2) sont inférieures à celles des trois autres SBVD et les valeurs de PISCO sont supérieures à celles des stations.

Pour obtenir des informations plus précises sur ces différences, le tableau A3.2 a été construit. Il montre, pour chaque SBVD, les précipitations moyennes annuelles entre 2012 et 2016, et les différences entre données de stations et données PISCO. Ce tableau montre ce qui a déjà été présenté dans la figure A3.1, c'est à dire que le SBVD-3, le SBVD-4 et le SBVD-5 ont les quantités de pluies les plus fortes (environ 380 mm/an, 300 mm/an et 500 mm/an, respectivement), car ils se localisent dans la cordillère des Andes, tandis que les quantités des SBVD-1 et SBVD-2 (environ 5 mm/an et 25 mm/an, respectivement) sont plus basses, car ils se localisent plus près de la côte péruvienne qui est caractérisée par ses précipitations faibles. Dans les deux premiers SBVD, les différences sont fortes et positives ($\Delta_{SBVD-1} = 18,7\%$; $\Delta_{SBVD-2} = 30,8\%$), c'est-à-dire qu'ici, les valeurs de PISCO sont supérieures à celles des stations. Cependant, dans les cas des autres SBVD, cette différence est plus faible et négative ($\Delta_{SBVD-3} = -8,9\%$; $\Delta_{SBVD-4} = 8,6\%$; $\Delta_{SBVD-5} = -4,1\%$), c'est-à-dire que les valeurs de PISCO sont inférieures à celles des stations.



Figure A3.1. Précipitations journalières entre 2012-2016 pour les sous-bassins versants définis (SBVD) issues des données des stations pluviométriques et du produit PISCO,

- (A) SBVD-1 : Formé par le sous-bassin versant Baja río Rímac
- (B) SBVD-2 : Formé par le sous-bassin versant Jicamarca - Santa Eulalia
- (C) SBVD-3 : Formé par le sous-bassin versant Río Santa Eulalia
- (D) SBVD-4 : Formé par les sous-bassins versants Santa Eulalia – Parac, Parac – Alta río Rímac, et Quebrada Parac
- (E) SBVD-5 : Formé par les sous-bassins versants Alta río Rímac et Río Blanco

SOURCE : SENAMHI, 2018a; SENAMHI, 2018b
Élaboration personnelle

Tableau A3.2. Précipitations moyennes annuelles (2012 - 2016) par sous-bassin versant défini (SBVD) et différences entre valeurs des stations pluviométriques et celles du produit PISCO

SOUS-BASSINS VERSANT DÉFINIS (SBVD)	PRÉCIPITATION MOYENNE ANNUELLE ENTRE 2012 ET 2016 (mm)		Δ % 1/
	SELON STATION	SELON PISCO	
SBVD-1	5,0	5,9	18,7
SBVD-2	20,6	26,9	30,8
SBVD-3	399,7	364,2	-8,9
SBVD-4	317,5	290,2	-8,6
SBVD-5	530,1	508,5	-4,1

1/ La différence entre la précipitation enregistrée par les stations et celle du produit PISCO exprimée en pourcentage est calculée avec la formule suivante : $\Delta\% = (P_{PISCO} - P_{STATION})/P_{STATION} * 100$

SOURCE : SENAMHI, 2018a ; SENAMHI, 2018b

Élaboration personnelle

De plus, dans le SBVD-2, qui a la différence la plus grande et où se trouve la ville de Chosica, les données PISCO montrent qu'il y a eu des précipitations presque tous les jours du premier trimestre de chaque année. Cependant, cette situation ne s'est pas produite en réalité, selon quelques habitants du quartier San Antonio – 2^{ème} zone (dans le torrent Pedregal à Chosica) ; en effet, ils disent dans leurs témoignages sur les laves torrentielles qui se sont produites dans leur torrent en 2012 et 2015, que les pluies n'ont pas été aussi fréquentes que ce qu'indique le produit PISCO.

Ainsi, il apparaît finalement que les données du produit PISCO présentent des excès de pluies dans les régions plates et proches de l'océan (comme les régions SBVD-1 et SBVD-2), et sont probablement plus précises dans les régions qui comprennent des montagnes et qui se trouvent à haute altitude, comme les régions SBV-3, SBVD-4 et SBVD-5. En effet, les pixels PISCO des SBVD 1 et 2 intègrent aussi bien des régions basses que des régions de montagne.

ANNEXE 4

DESCRIPTION GÉOMORPHOLOGIQUE DÉTAILLÉE DE 4 TORRENTS DE LA VILLE DE CHOSICA (QUIRIO, PEDREGAL, CAROSSIO ET CORRALES)

(RELATIVE AU CHAPITRE III)

DESCRIPTION GÉOMORPHOLOGIQUE DÉTAILLÉE DE 4 TORRENTS DE LA VILLE DE CHOSICA (QUIRIO, PEDREGAL, CAROSSIO ET CORRALES)

Extrait du document « Laves torrentielles à Lurigancho-Chosica (Lima – Pérou) : L'évolution du risque et des mesures de gestion » (Mejía, 2017)

A. TORRENT QUIRIO (figure A4.1)

Le bassin-versant de ce torrent a une superficie de 11 km², une longueur de 5 km, une altitude en amont de 1800 m, une pente moyenne de 28 % (15,6°), et une orientation 320° NO (Guadalupe et Carrillo, 2012) ; il est localisé au niveau du km 33 de l'Autoroute Centrale. Il est considéré comme un des bassin versants torrentiels les plus grands de la ville de Chosica, avec un cône de déjection de 1450 m de largeur, et un chenal bien défini (Nuñez *et al.*, 2015).

Dans la zone de production (partie supérieure du bassin-versant torrentiel), la pente est de 20° et elle se réduit brusquement dans la zone de transfert (partie centrale du bassin versant torrentiel) et dans la zone de dépôt (partie inférieure du bassin versant torrentiel) jusqu'à passer à 2° à la confluence. Le lit majeur de ce bassin versant torrentiel a une largeur de 350 m, alors que celle du chenal est comprise entre 20 m et 30 m dans la partie centrale, 15 m dans la partie inférieure, et 10 m près de la confluence, où il est canalisé avec des murs en béton de 2 m de hauteur, afin de favoriser l'établissement de la zone urbaine (Ibid).

Compte tenu de ces caractéristiques, il est possible de dire que le torrent Quirio est hautement susceptible à la production de flux de sédiments et de boue. La preuve en est que de grandes quantités de sédiments ont été enregistrées lors de l'événement de 2015, et plus encore en 1987 (Ibid).

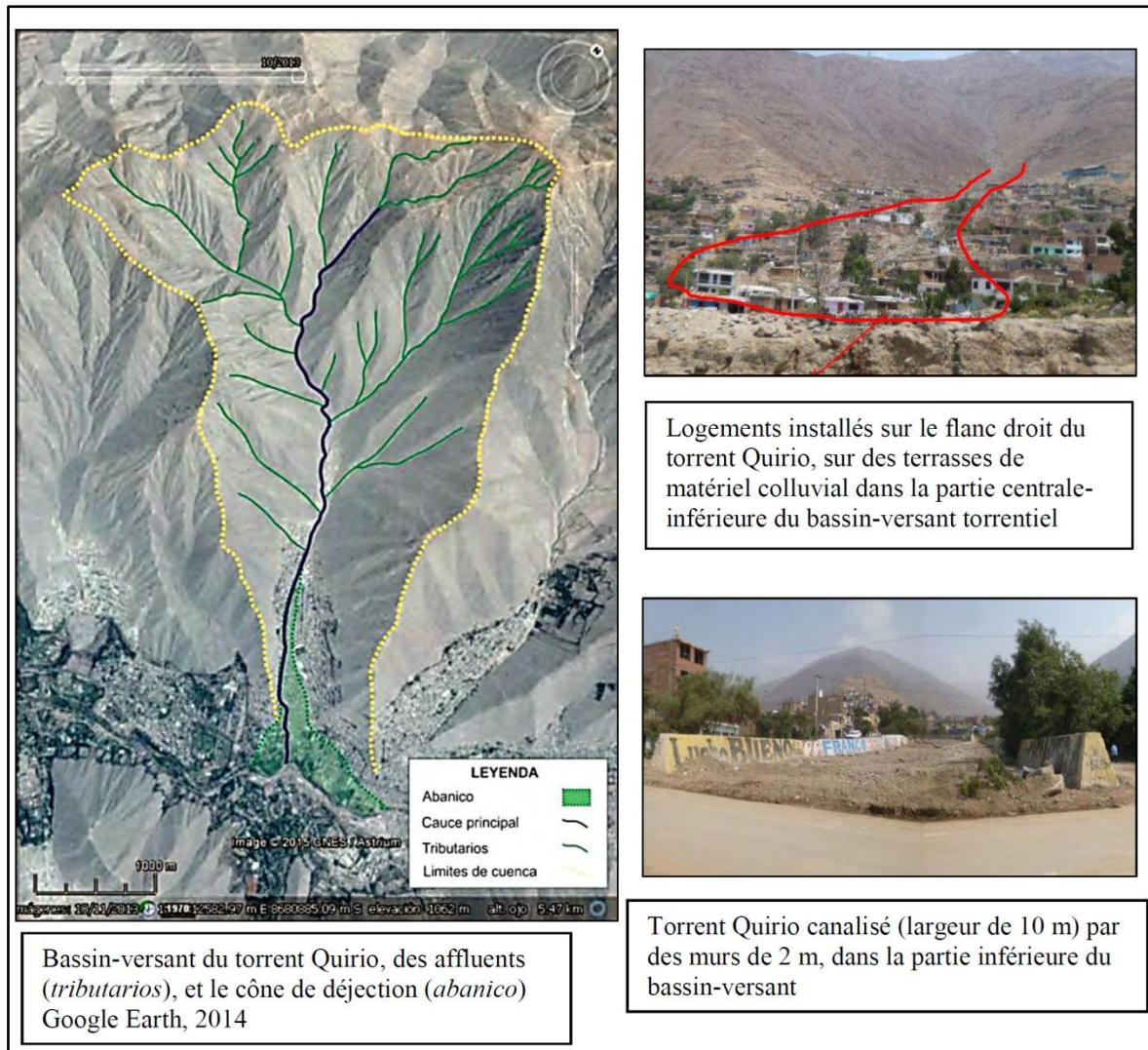


Figure A4.1. Torrent Quirio

SOURCE : Nuñez *et al.*, 2015

B. TORRENT PEDREGAL (figure A4.2)

Le bassin versant du torrent Pedregal a une superficie de 10 km², une longueur de 5 km, une altitude maximale de 2000 m, une pente moyenne de 30 % (16,7°), et une orientation NS (Guadalupe et Carrillo, 2012). Il se localise au niveau du km 34 de l'Autoroute Centrale, avec un cône de déjection de 850 m de largeur (Nuñez *et al.*, 2015).

La pente atteint 20° dans la zone de production, mais elle se réduit à 10° dans la zone de transfert, et finit avec moins de 2° à la confluence avec le Rimac. Le lit majeur de ce bassin versant torrentiel a une largeur de 300 m dans la partie centrale, alors que le chenal varie entre 15 et 20 m, avec une profondeur de 15 m environ. Dans la partie inférieure, il est

canalisé avec des murs de béton, dont la plupart ont été endommagés et cassés par les flux de sédiments des laves torrentielles lors de tous les événements (Ibid).

De même que le torrent Quirio, le torrent Pedregal est très susceptible de produire des flux de sédiments et de boue. En 1987, lors de l'événement le plus fort, des sédiments et de la boue ont été transportés le long du lit du torrent, alors qu'en 2015, le déplacement de sédiments s'est produit dans la partie supérieure du bassin versant torrentiel, mais à l'approche de la confluence, le flux était seulement de boue (Ibid).

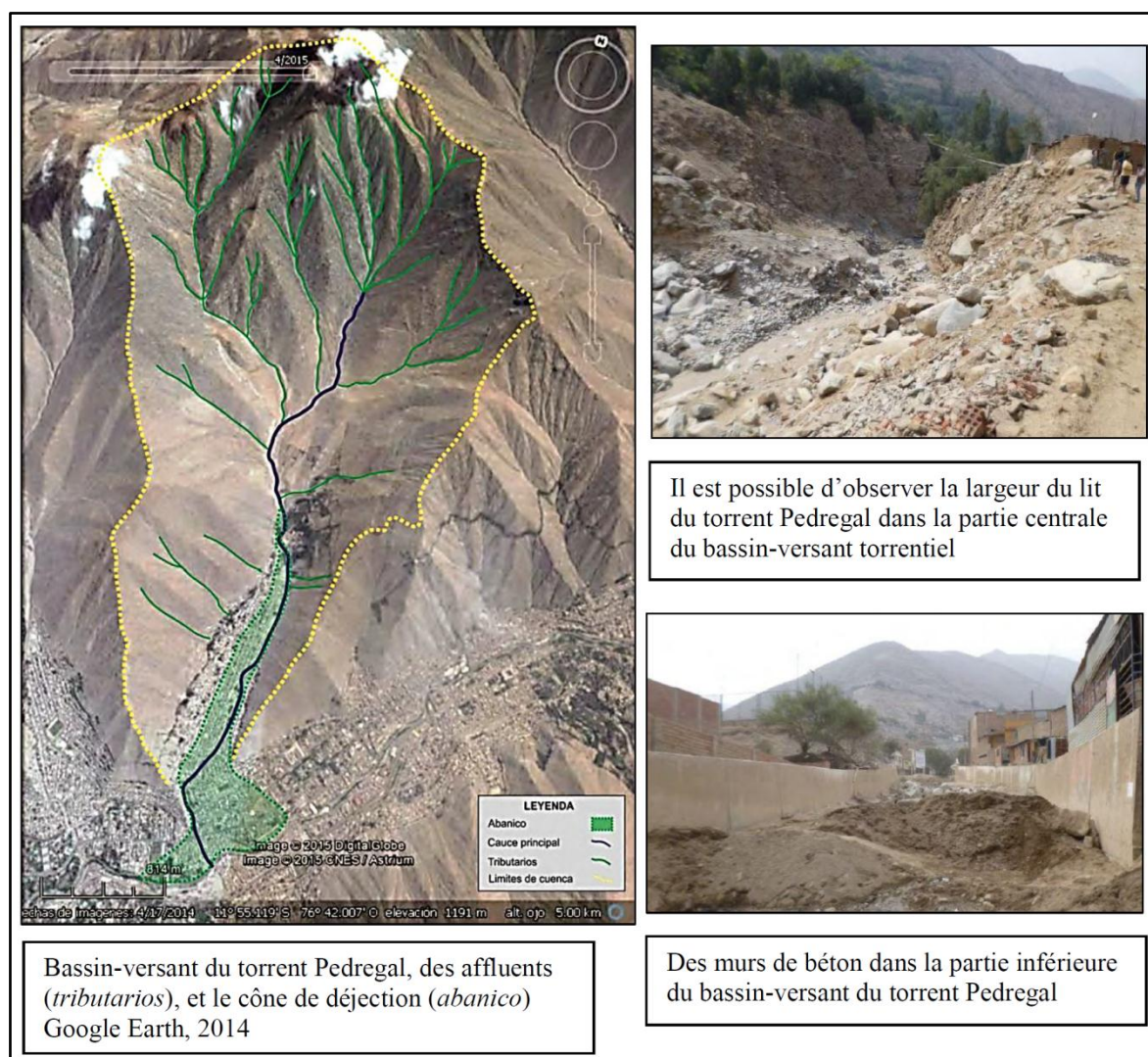


Figure A4.2. Torrent Pedregal

SOURCE : Nuñez *et al.*, 2015

C. TORRENT CAROSSIO (figure A4.3)

Le bassin versant de ce torrent a une superficie de 0,5 km² environ (GOOGLE EARTH, 2017), une longueur de 700 m, une altitude maximum de 1400 m, une forte pente de 40 % (21.8°) et une orientation 320° NO (Guadalupe et Carrillo, 2012) ; il est localisé au niveau du km 35,5 de l'Autoroute Centrale (Nuñez *et al.*, 2015).

La pente atteint 20° environ dans la zone de production, elle se réduit à 10° dans la zone de transfert, et dans la zone de dépôt, elle a une valeur inférieure à 10°, mais plus forte que celles des torrents Quirio et Pedregal (Ibid).

La particularité du torrent Carossio est que son chenal est plus étroit que celui des torrents Quirio et Pedregal, avec une largeur de 8 m environ (GOOGLE EARTH, 2017) et la partie inférieure du bassin versant torrentiel est partiellement canalisée par des murs de pierres (Nuñez *et al.*, 2015). En plus, ce torrent ne possède pas de zone d'évacuation d'eaux, puisqu'il y a des logements et des pistes asphaltées sur le trajet du chenal avant la confluence avec la rivière Rímac (Ibid).

Même si les roches ne sont pas aussi fracturées et météorisées que celles de Quirio et Pedregal, la forte pente fait que le torrent est très susceptible à la production de flux de sédiments et de boue, comme cela a été le cas lors des événements de 1987 et 2015. L'importance de la pente fait aussi qu'il n'y a pas de logements dans la partie centrale du bassin versant torrentiel. La population se trouve seulement dans le cône de déjection (Ibid).

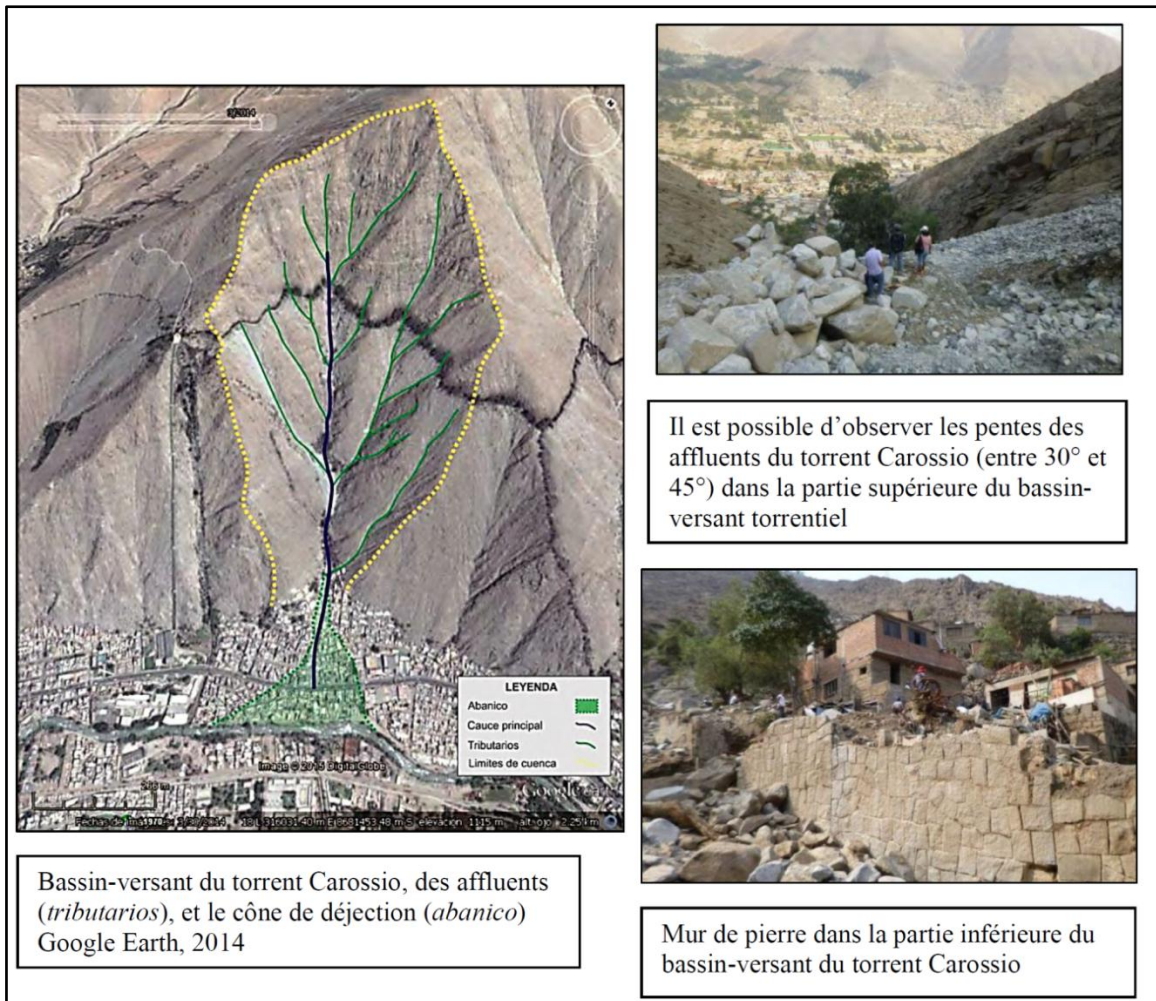


Figure A4.3. Torrent Carossio

SOURCE : Nuñez *et al.*, 2015

D. TORRENT CORRALES - RAYOS DE SOL (figure A4.4)

Le bassin versant de ce torrent possède une superficie de 1,5 km² environ (GOOGLE EARTH, 2017), une longueur de 1 km, une altitude maximum de 1450 m, une forte pente de 40 % (21,8°) et une orientation 320° NO (Guadalupe et Carrillo, 2012) ; il est localisé au niveau du km 36 de l'Autoroute Centrale (Nuñez *et al.*, 2015).

Les pentes dans les différentes zones du bassin versant torrentiel de Corrales sont similaires à celles du torrent Carossio (Ibid). Cependant, le chenal a une largeur de 15 m environ (GOOGLE EARTH, 2017). La partie centrale-inférieure du bassin versant torrentiel est aussi partiellement canalisée par des murs de pierres, mais à la différence du torrent Carossio, le torrent débouche dans la rivière Rímac, sans la présence de logements sur le trajet du chenal (Nuñez *et al.*, 2015).

Ce torrent est aussi susceptible de produire des flux de sédiments et de boue dû à sa forte pente. Dans le cas de l'événement de 2015, grâce à cette inclinaison, des blocs de grandes dimensions se sont déplacés facilement depuis la partie supérieure du bassin versant torrentiel jusqu'à la confluence avec la rivière Rímac, endommageant des logements qui se trouvent dans la zone de dépôt et ses environs (Ibid), comme cela a été précisé dans la section sur les dégâts en 2015, dans l'annexe 1 « Récit détaillé des dégâts lors des différentes laves torrentielles en 2012, 2015 et 2017 ».

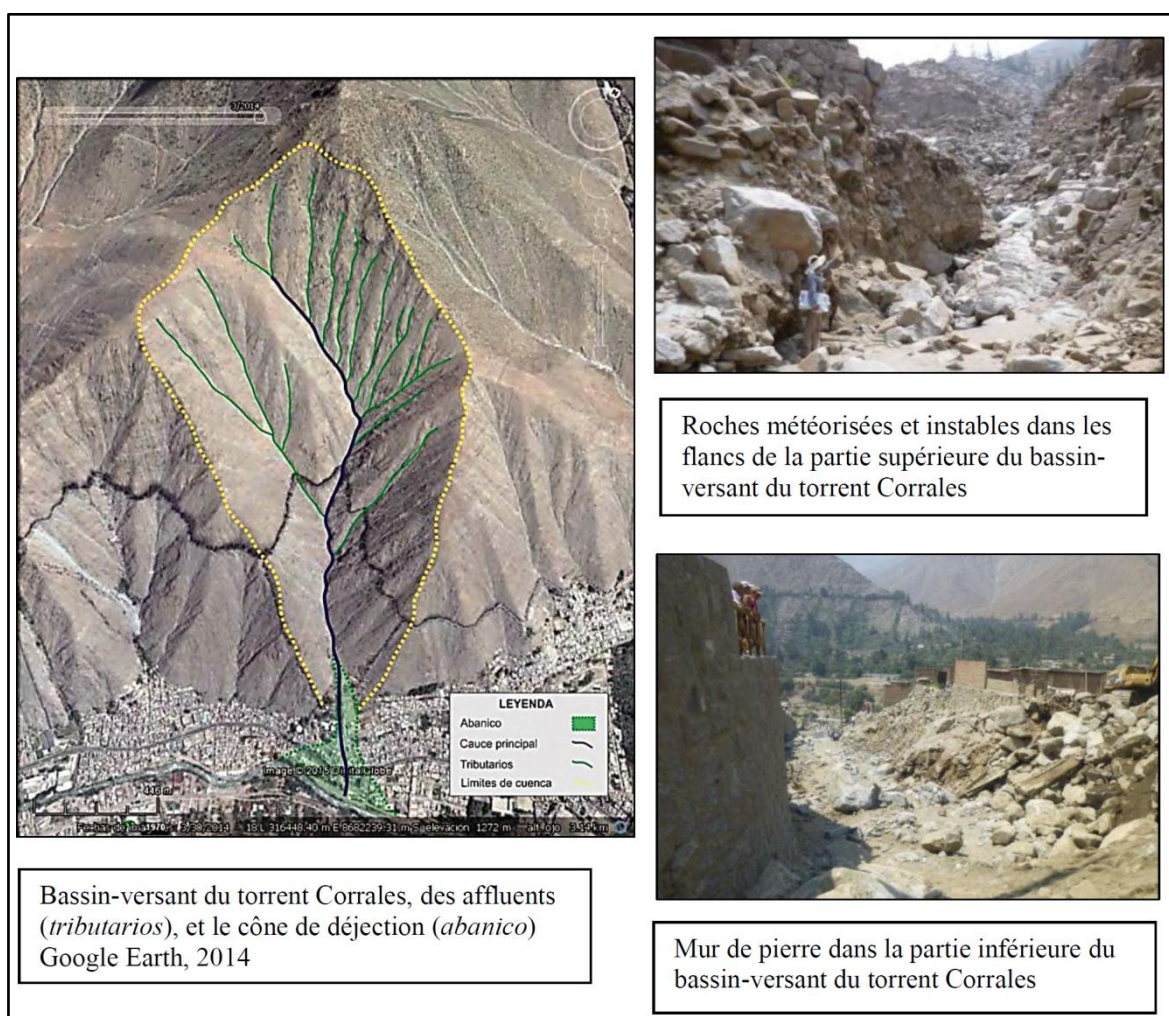


Figure A4.4. Torrent Corrales

SOURCE : Nuñez *et al.*, 2015

TABLE DES FIGURES

Figure 1. Localisation de la ville de Chosica	13
Figure 2. Bassin versant et sous-bassins versants de la rivière Rímac – Ville de Chosica	15
Figure 3. Précipitations et débits mensuels (septembre-août) entre 1969 et 2004 du bassin versant de la rivière Rímac (exprimés en pourcentage des valeurs annuelles)	16
Figure 4. Carte hydrographique de la ville de Chosica	17
Figure 5. Localisation des zones habitées de la ville de Chosica selon le type de relief (zone plate et zone de collines)	19
Figure 6. Logement construit avec des matériaux fragiles dans le torrent Pedregal	19
Figure 7. Niveaux de risque hydrologique des pâtés de maisons résidentiels de la rive droite de la rivière Rimac au niveau de la ville de Chosica	20
Figure 8. Digue construite dans le torrent La Libertad en 2013	22
Figure 9. Barrera Dinámica installée dans le torrent La Libertad à la fin de l'année 2015	25
Figure 10. Classification des mouvements de terrain selon le type de matériau concerné et la teneur en eau	31
Figure 11. Le cycle de l'eau (la précipitation comme une des composantes principales)	36
Figure 12. Graphique spatiale des variations des précipitations moyennes annuelles pour les différents phénomènes d'El Niño et La Niña (1965-2007)	40
Figure 13. Régions du Pacifique Equatorial pour l'analyse de la TSO	41
Figure 14. Variation de la TSO selon les indices E et C	42
Figure 15. Variations de la TSO (en Niño 1+2 et en Niño 3.4) et de l'IOA pendant les premiers trimestres de 1870 à 2017	44
Figure 16. Pluviomètre artisanal fabriqué avec des objets courants promu par le COE-CHOSICA	47
Figure 17. Le bassin versant de la rivière Rímac, le district de Lurigancho-Chosica et la ville de Chosica, ainsi que les stations pluviométriques du SENAMHI pour l'analyse des précipitations	50

Figure 18. Précipitations annuelles par région (bassin versant de la rivière Rímac, district de Lurigancho-Chosica et ville de Chosica) selon les données du produit PISCO entre 1981 et 2017	51
Figure 19. Cycle annuel des précipitations au niveau du bassin versant de la rivière Rímac, du district de Lurigancho-Chosica et de la ville de Chosica entre janv.-1981 et dec.-2016	52
Figure 20. Relation entre les données mensuelles de l'indice Niño 1+2 et la quantité de pluie (mm) par région (bassin versant de la rivière Rímac, district de Lurigancho-Chosica et ville de Chosica) entre 1981 et 2016	54
Figure 21. Précipitation journalière entre 2012-2016 pour la station Chosica avec les données des stations pluviométriques et celles du produit PISCO	55
Figure 22. Quantité de précipitation et intensité globale des écoulements torrentiels par jour entre janvier et avril pour les années 2012, 2015 et 2017	61
Figure 23. Modèle de régression linéaire entre l'intensité globale des écoulements torrentiels par jour et la quantité de pluie (mm) à la station de Chosica les jours de déclenchements entre 2012 et 2017	61
Figure 24. Barrières de filet conçues pour retenir de gros rochers et de la neige	63
Figure 25. Premier modèle à échelle 1:1 d'une barrière flexible pour faire face aux laves torrentielles en 2005 dans le torrent Ilgraben (Suisse)	64
Figure 26. Types de pressions que la barrière flexible reçoit face à différents moments d'impact des laves torrentielles	65
Figure 27. La barrière flexible et ses éléments	67
Figure 28. Modélisation des barrières flexibles face aux pressions produites par des laves torrentielles	69
Figure 29. Vue frontale et vue d'en haut d'un essai de laboratoire dans le cadre de l'évaluation du comportement d'une barrière flexible	69
Figure 30. Installation de la barrière flexible # 4 dans le torrent Pedregal à Chosica	74
Figure 31. Transport par hélicoptère des matériaux pour installer la barrière flexible # 13 dans le torrent La Libertad à Chosica	74
Figure 32. Barrière flexible # 13 dans le torrent La Libertad à Chosica (barrière type UX avec 2 supports intermédiaires)	75
Figure 33. Barrière flexible # 10 dans le torrent Carossio à Chosica (barrière type UX avec 6 supports intermédiaires)	75

Figure 34. Localisation des 21 barrières flexibles installées dans la ville de Chosica	77
Figure 35. Localisation des barrières dans le torrent Carossio à Chosica	78
Figure 36. Matériel retenu par les barrières flexibles à Chosica	79
Figure 37. Dommages subis par la barrière # 15 dans le torrent Quirio	80
Figure 38. Travaux de nettoyage et de renforcement des barrières à Chosica	81
Figure 39. Actions de surveillance de l'ANA au niveau de la barrière #13 du torrent La Libertad	81
Figure 40. Chenal de la partie inférieure du bassin versant torrentiel de La Libertad	85
Figure 41. Variation de la profondeur du chenal du torrent Pedregal	85
Figure 42. Chenal du torrent Carossio transformé en une piste asphaltée, presque au niveau des logements	86
Figure 43. Barrières flexibles à Chosica selon le volume retenu lors des laves torrentielles de 2017	89

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1. Date et torrents déclenchés dans la ville de Chosica en 2017	26
Tableau 2. Date et intensité des laves torrentielles dans la ville de Chosica en 2017 selon le COE-CHOSICA	29
Tableau 3. Niveaux d'intensité des écoulements des torrents de la ville de Chosica	31
Tableau 4. Date et intensité des écoulements torrentiels dans la ville de Chosica en 2012, 2015 et 2017	32
Tableau 5. Ensemble des écoulements torrentiels selon le niveau d'intensité dans la ville de Chosica en 2012, 2015 et 2017	35
Tableau 6. Phénomènes El Niño et La Niña forts et modérés entre 1965 et 2007 selon la valeur de l'IOA	39
Tableau 7. Date, quantité de pluie et intensité des écoulements torrentiels dans la ville de Chosica en 2012, 2015 et 2017	58
Tableau 8. Quelques spécifications techniques des barrières flexibles fabriquées par Geobrugg (en avril 2018)	70
Tableau 9. Barrières flexibles devant être installées à la fin de 2015	72
Tableau 10. Information sur les barrières flexibles installées à Lima à la fin de 2015	73
Tableau 11. Coût et dates des travaux de nettoyage et de protection des barrières flexibles à Chosica établis à la fin de 2017	82
Tableau 12. Caractéristiques de la géométrie des 8 bassins versant torrentiels de la zone d'étude	84
Tableau 13. Information quantitative sur le matériel retenu par les barrières flexibles à Chosica lors des laves torrentielles de 2017	88
Tableau 14. Classification des barrières flexibles à Chosica selon le volume retenu lors des laves torrentielles de 2017	89

TABLE DES FIGURES ET DES TABLEAUX DES ANNEXES

TABLE DES FIGURES

Figure A1.1. Laves torrentielles en 2012 sur la rive droite de la rivière Rimac	105
Figure A1.2. Laves torrentielles en 2012 sur la rive gauche de la rivière Rimac	106
Figure A1.3. Laves torrentielles en 2015	108
Figure A1.4. Laves torrentielles en 2017	109
Figure A2.1. Circulation de Walker le long de l'Équateur pour des conditions normales et pour des conditions <i>El Niño</i>	112
Figure A2.2. Conditions normales de l'océan et de l'atmosphère dans l'océan Pacifique (décembre-février)	113
Figure A2.3. Conditions de l'océan et de l'atmosphère dans l'océan Pacifique pendant <i>El Niño</i> (décembre-février 1997-1998)	114
Figure A3.1. Précipitations journalières entre 2012-2016 pour les sous-bassins versants définis (SBVD) issues des données des stations pluviométriques et du produit PISCO	118
Figure A4.1. Torrent Quirio	122
Figure A4.2. Torrent Pedregal	123
Figure A4.3. Torrent Carossio	125
Figure A4.4. Torrent Corrales	126

TABLE DES TABLEAUX

Tableau A3.1. Sous-bassins versants définis (SBVD), sous-bassins versants de la rivière Rimac et stations pluviométriques qu'ils comprennent	117
Tableau A3.2. Précipitations moyennes annuelles (2012 - 2016) par sous-bassin versant défini (SBVD) et différences entre valeurs des stations pluviométriques et celles du produit PISCO	119

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	2
RÉSUMÉ	3
SOMMAIRE	6
TABLE DES ABREVIATIONS	7
INTRODUCTION	9
CHAPITRE I : EXPÉRIENCES DES DERNIERS ÉPISODES DE LAVES TORRENTIELLES DANS LA VILLE DE CHOSICA	12
1.1. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE	12
1.2. CONSÉQUENCES DES DERNIERS EVENEMENTS DE LAVES TORRENTIELLES	21
1.2.1. Dommages et actions après la catastrophe de 2012	21
1.2.2. Dommages et actions après la catastrophe de 2015	23
1.2.3. Dommages et actions après la catastrophe de 2017	26
1.3. COMPARAISON DE L'INTENSITE DES LAVES TORRENTIELLES DE 2012, 2015 ET 2017	28
CHAPITRE II : LES PRÉCIPITATIONS ET L'INTENSITE DES LAVES TORRENTIELLES À CHOSICA, UNE RELATION DIRECTE ?	36
2.1. PRECIPITATIONS SUR LA CÔTE PÉRUVIENNE ET VARIABILITÉ LIÉE À L'ENSO	36
2.1.1. Les pluies moyennes	37
2.1.2. La variabilité des pluies liée à l'ENSO	38
<i>a. Indice d'Oscillation Australe et pluie au Pérou</i>	38
<i>b. Température de surface océanique sur le Pacifique et pluies sur la côte péruvienne</i>	41
<i>c. El Niño Costero et les pluies sur la côte péruvienne</i>	42
2.2. ANALYSE DES PRECIPITATIONS À CHOSICA	45
2.2.1. Les différents types d'enregistrements	45
<i>a. Pluviomètres</i>	45

<i>b. Produit PISCO, résultat du traitement d'information satellitaire de précipitation et d'enregistrements de pluviomètres</i>	47
<i>c. Radar météorologique</i>	48
2.2.2. Traitement et comparaisons des données de précipitations	49
<i>a. Répartition spatiale des pluies annuelles dans les 3 régions définies (le bassin versant Rímac, le district de Lurigancho-Chosica et la ville de Chosica)</i>	50
<i>b. Cycle annuel des pluies pour les 3 régions définies (le bassin versant Rímac, le district de Lurigancho-Chosica et la ville de Chosica)</i>	52
<i>c. Relation entre les pluies mensuelles pour les 3 régions définies (le bassin versant Rímac, le district de Lurigancho-Chosica et la ville de Chosica) et l'indice Niño 1+2</i>	52
<i>d. Comparaison entre les données PISCO et celles des stations pluviométriques</i>	54
2.3. RELATION ENTRE LES PRECIPITATIONS, L'OCCURRENCE ET L'INTENSITE DES LAVES TORRENTIELLES	56
CHAPITRE III : IMPACT DES BARRIÈRES FLEXIBLES SUR LA RÉDUCTION DE L'INTENSITÉ DES LAVES TORRENTIELLES À CHOSICA	62
3.1. UNE NOUVELLE MESURE STRUCTURELLE FACE AUX LAVES TORRENTIELLES : LES BARRIÈRES FLEXIBLES	62
3.2. DESCRIPTION DES BARRIÈRES FLEXIBLES À CHOSICA	71
3.3. ANALYSE GEOMORPHOLOGIQUE SUR LA BASE DU MATERIEL RETENU PAR LES BARRIÈRES FLEXIBLES ET RELATION AVEC L'INTENSITÉ DES LAVES TORRENTIELLES	78
3.3.1. Géomorphologie des torrents à Chosica	83
3.3.2. Quantité de matériel retenu par les barrières flexibles et relation avec l'intensité des laves torrentielles	86
CONCLUSION	93
BIBLIOGRAPHIE	98

ANNEXES	103
Annexe 1 : Récit détaillé des dégâts lors des différentes laves torrentielles de 2012, 2015 et 2017 (relative au chapitre I)	104
Annexe 2 : Description du phénomène « <i>El Niño</i> - Southern Oscillation (ENSO) » (relative au chapitre II)	110
Annexe 3 : Comparaison des enregistrements journaliers du produit PISCO et des stations pluviométriques pour des régions définies dans le bassin versant de la rivière Rímac (2012-2016) (relative au chapitre II)	115
Annexe 4 : Description géomorphologique détaillée de 4 torrents de la ville de Chosica (Quirio, Pedregal, Carossio et Corrales) (relative au chapitre III)	120
TABLE DES FIGURES	127
TABLES DES TABLEAUX	130
TABLE DES FIGURES ET DES TABLEAUX DES ANNEXES	131
TABLE DES MATIÈRES	132