

ALEJANDRO CANO VALENCIA

**GESTION DES EAUX PLUVIALES : ÉTUDE D'UN
QUARTIER DE LA VILLE D'AREQUIPA AU PÉROU**

Essai présenté

au Département de génie civil et de génie des eaux de l'université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en génie civil — technologies environnementales
pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE

UNIVERSITÉ LAVAL

QUÉBEC

2016

© Alejandro Cano Valencia, 2016

RÉSUMÉ

L'aménagement urbain au Pérou se fait sans prendre en compte la gestion des eaux pluviales. Si l'on ajoute à ce manque d'expertise l'urbanisation qui a pour effet d'augmenter l'imperméabilité des surfaces, ainsi que les phénomènes climatiques extrêmes — tels qu'*El Niño* et le changement climatique; on contribue à l'élévation des volumes de ruissellement sur les zones urbaines et à la majoration des débits de pointe dans les réseaux de drainage existants. La zone d'étude choisie dans cet essai est le quartier de Lara situé dans la ville d'Arequipa au Pérou, et qui est touché par les deux phénomènes précédents. Lara a aussi un problème de liquéfaction du sol lié aux niveaux phréatiques élevés dans les zones résidentielles.

Cet essai vise d'une part à évaluer la réduction des volumes de ruissellement et des débits de pointe au niveau de Lara et d'autre part à estimer la diminution des volumes d'infiltration dans les zones résidentielles du même quartier grâce à la mise en place de pratiques de gestion optimale (PGO) à la source telle que des barils de pluie, de la végétation et un stockage temporaire. Les scénarios hydrologiques ont été réalisés en utilisant des patrons de pluies locales pour des pluies courtes (1 heure) et des patrons de pluies triangulaires pour des pluies longues (24 heures). Tous les patrons de pluie ont été évalués pour des fréquences d'une récurrence de 2, 5 et 50 ans. Le modèle de base LARA prend en compte le réseau de drainage sous-terrain déjà présent à Lara. C'est lui qui sera comparé au modèle LARA-PGO qui a mis en place les PGO précédemment décrites. L'évaluation de l'efficacité de ces PGO est mesurée par des indices de performance tels que le volume de ruissellement de ce quartier, le débit de pointe à l'exutoire et le volume d'infiltration aux zones résidentielles.

Les résultats du modèle LARA-PGO montrent que c'est la mise en place de toutes ces PGO qui permet de réduire le plus efficacement les volumes de ruissellement au niveau du quartier, et ce pour toutes les fréquences de récurrence. Les barils sont bien plus efficaces que les autres PGO pour ce qui est de diminuer les volumes d'eau. Quant aux débits de pointes, aucune des PGO — qu'elles soient utilisées seules ou combinées n'arrive à diminuer ces derniers de façon significative. L'efficacité de la végétation installée, tant pour les volumes de ruissellement que pour les débits de pointe, est difficile à déterminer en raison de l'éventail des valeurs de capacité d'infiltration ultime des sols de Lara. Finalement, l'installation de barils de pluie dans l'optique de réduire les volumes d'infiltration est plutôt efficace pour des maisons d'une superficie de 134 m² maximum lorsqu'il s'agit de pluies fréquentes d'une récurrence de 2 ans.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	II
TABLE DES MATIÈRES	III
LISTE DES TABLEAUX	V
LISTE DES FIGURES.....	VI
LISTE DES PHOTOS	VII
LISTE DES ACRONYMES.....	VIII
DÉDICACE.....	IX
REMERCIEMENTS	X
1. INTRODUCTION.....	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Objectif	2
1.3 Contenu.....	2
2. REVUE DE LA LITTÉRATURE	4
2.1 Climat du Pérou.....	4
2.1.1 Climat de la ville d'Arequipa.....	5
2.1.2 Phénomènes extrêmes.....	5
2.2 Hydrographie	6
2.3 Approches du drainage urbain au Pérou.....	6
2.3.1 Étude de l'hydrologie péruvienne (IILA).....	7
2.3.2 Norme péruvienne de drainage urbain OS.060.....	8
2.4 État de l'art du drainage pluvial au Pérou	8
2.4.1 DU au temps des Incas	9
2.4.2 DU : Cas de la ville de Sullana	10
2.4.3 DU : Cas de la ville de Cusco	11
2.4.4 DU : Ville d'Arequipa et quartier de Lara.....	11
2.5 Pratiques de gestion optimale (PGO) à la source	12
3. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	14
3.1 Localisation.....	14
3.2 Occupation du territoire	14
3.3 Réseau de drainage urbain.....	16
3.4 Problématique de Lara liée aux eaux pluviales	17

4. MÉTHODOLOGIE DE MODÉLISATION ET D'ÉVALUATION	19
4.1 Modèle macroscopique.....	19
4.1.1 Précipitation pluviale.....	20
4.1.2 Infiltration.....	24
4.1.3 Stockage et ruissellement.....	25
4.2 Modèles conceptuels LARA et LARA-PGO.....	26
4.3 Modélisation avec le logiciel SWMM 5.1	28
4.4 Scénarios critiques (SC) et indices de performance (IP).....	31
4.4.1 Scénarios critiques (SC).....	31
4.4.2 Indice de performance (IP)	32
5. RÉSULTATS.....	34
5.1 Modèle LARA — Scénarios critiques (SC).....	34
5.2 Modèle LARA-PGO	35
5.2.1 Indice de performance volume IP_V	35
5.2.2 Indice de performance débit IP_D	36
5.2.3 Indice de performance infiltration IP_I	39
CONCLUSION.....	40
RÉFÉRENCES	43
A. Tableaux.....	46
B. Figures	50

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Occupation de territoire de Lara	15
Tableau 2. Paramètres des courbes IDF-Lara	21
Tableau 3. SWMM, options de simulation	28
Tableau 4. SWMM, pluviomètres	28
Tableau 5. SWMM, paramètres des sous-bassins, modèle LARA	29
Tableau 6. SWMM, paramètres des sous-bassins des modèles LARA/LARA-PGO.....	30
Tableau 7. SWMM, paramètres du baril.....	30
Tableau 8. SWMM, Nœud et exutoires du réseau urbain Lara.....	30
Tableau 9. SWMM, Conduits du réseau urbain Lara.....	31
Tableau 10. Exemple de la détermination des scénarios critiques (SC).....	32
Tableau 11. Indices de performance par PGO	32
Tableau 12. Scénarios critiques (SC) du modèle LARA	34
Tableau 13. Résultats du modèle LARA-PGO, volumes totaux de ruissellement.....	35
Tableau 14. Hauteurs de pluie des modèles LARA et LARA-PGO, IP_V	36
Tableau 15. Résultats du modèle LARA-PGO, débits de pointe	36
Tableau 16. Hauteurs de la pluie des modèles LARA et LARA-PGO, IP_D	37
Tableau 17. Résultats des modèles LARA/LARA-PGO, Volume d'infiltration.....	39
Tableau 18. Étude IILA, paramètres « k », et « ϵ_g » des zones pluviométriques du Pérou..	46
Tableau 19. Étude IILA, paramètres « n », et « a » des zones pluviométriques du Pérou ...	47
Tableau 20. Valeurs des eaux canalisées (t_T).	48
Tableau 21. Patrons de pluie d=1h, méthode du bloque alterne	49

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Zones pluviométriques du Pérou, étude IILA (MVCS, 2014)	7
Figure 2. Schéma d'un « Anden », citadelle de Machu Picchu (Wright, et coll. 2000).....	9
Figure 3. Localisation de Lara (Ettinger, et coll. 2015)	14
Figure 4. Délimitation de Lara (UNSA, 2002)	14
Figure 5. Distribution spatiale de l'occupation du territoire de Lara	15
Figure 6. Réseau du DU conçu pour Lara.....	17
Figure 7. Modèle macroscopique des sous-bassins, adapté (Rossman, et coll. 2016).....	19
Figure 8. Courbes IDF de la zone d'étude.....	21
Figure 9. P_{24h} vs. T.....	22
Figure 10. Hyetogrammes $d=1h$, $T= 2, 5$ et 50 ans	23
Figure 11. Hyetogrammes $d=24h$, $T= 2, 5$ et 50 ans	23
Figure 12. Gamme de valeurs de K_s de Lara (MDDELCC, 2010)	24
Figure 13. Modèles conceptuels LARA et LARA-PGO	27
Figure 14. Scénarios de ruissellement de pluie des zones résidentielles	27
Figure 15. SWMM, sous-bassins des modèles LARA et LARA-PGO	29
Figure 16. SWMM, Réseau pluvial de Lara.....	31
Figure 17. Indices de performance de volume (IP_V) et débit (IP_D)	33
Figure 18. Indice de performance d'infiltration (IP_I)	33
Figure 19. Résultats du modèle LARA-PGO, Indice de performance volume (IP_V).....	35
Figure 20. Résultats du modèle LARA-PGO, Indice de performance débit (IP_D)	37
Figure 21. Débits de pointe à l'exutoire Chilpinilla des modèles LARA et LARA-PGO.....	38
Figure 22. Résultats du modèle LARA-PGO, Indice de performance d'infiltration (IP_I).....	39
Figure 23. Régions géomorphologiques du Pérou	50
Figure 24. Climats de la région Arequipa (classification Thornthwaite)	51

LISTE DES PHOTOS

Photo 1. « Andenes » urbaines dans la citadelle Machu Picchu (Oquendo, 2010)	9
Photo 2. « Monolito Sayhuite » (Ancajima Ojeda 2013)	10
Photo 3. Ruisseau « La Quebrada », ENOS -El Niño 1983 (Sullana, 2009)	11
Photo 4. Canal-voie « La Quebrada » (Sullana, 2009).....	11
Photo 5. Déchets dans les réseaux de DU de la ville de Cuzco (Cusco Portada, 2015).....	11
Photo 6. Grilles métalliques et regard d'inspection.....	16
Photo 7. Drainage pluvial du toit de résidence typique (GE, 2015).....	18

LISTE DES ACRONYMES

ENSO	Oscillation australe <i>El Niño</i> , en anglais
ILLA	Institut Italo-Latino-Américain
INDECI	Agence de protection civile péruvienne, en espagnol
MVCS	Ministère du Logement, de la Construction et de l'Assainissement péruvien, en espagnol
NU	Nations Unies
PGO	Pratiques de gestion optimale
UNSA	Université publique San Agustín, en espagnol

DÉDICACE

Este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo y soporte de mi esposa Mónica, la alegría contagiante de mi hijo Kael y el aliento incondicional de mis padres Carmen y Jose Carlos. Me faltan las palabras para describir mi gratitud hacia ustedes, en especial a mi mamita que está leyendo estas líneas allá en cielo.

REMERCIEMENTS

D'abord, je tiens à remercier ma directrice de recherche, Mme Geneviève Pelletier, pour l'énergie investie dans ce projet ainsi que pour l'intérêt porté pour connaître et comprendre le savoir-faire péruvien en matière de gestion des eaux pluviales. Son soutien m'a été très précieux tout au long de cet essai, notamment lors des moments difficiles.

Je remercie également Mme Sophie Duchesne, M. Robert Lagacé et M. Jean-Loup Robert pour avoir été présent lors de mon séminaire et m'avoir apporté leurs commentaires et recommandations dans le but d'améliorer cet essai.

Finalement, je souhaite aussi remercier M. Luis Fernando Malaga Gonzales pour m'avoir fourni les informations nécessaires afin d'approfondir mon étude du quartier de Lara.

1. INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

L'accès à l'eau potable et à l'assainissement est actuellement la priorité pour tous les pays d'Amérique latine. Pourtant, cette région du monde ne considère pas la gestion des eaux pluviales comme quelque chose de primordial (UNIANDDES 2016). Pour s'en convaincre, il suffit de regarder ce qui est arrivé au Pérou en 1970 lors du dernier orage dans sa capitale, Lima : il a suffi de 17 mm de pluie en 24 h pour causer de nombreux dégâts tels que des coupures de courant (El Comercio 2016).

La récente urbanisation du pays s'est organisée suivant les critères de construction de la ville de Lima, c'est-à-dire sans prendre en compte la gestion des eaux pluviales. Tel est le cas de la ville d'Arequipa qui jusqu'à maintenant n'a aucune guide de gestion des eaux pluviales, malgré les efforts ponctuels de certains arrondissements. La ville est sujette aux inondations dont les conséquences sont souvent dramatiques : perte de vies humaines, effondrement de réseaux sanitaires et obstruction de routes.

Au problème des précipitations pluviales d'Arequipa, s'ajoutent les apports de sédiments provenant de l'érosion des montagnes qui entourent cette ville, ce qui ne fait qu'empirer la situation. Quand l'eau s'engouffre dans les ravins, elle forme des torrents — appelés *Huaycos* en quechua¹, qui traversent la ville. Les voies d'évacuation des eaux pluviales sont de grands canaux de surface qui traversent Arequipa en direction des rivières *Chili* et *Andamayo*. La capacité des canaux commence à être dépassée dû au manque d'entretien. L'imperméabilisation des champs agricoles, elle, augmente les volumes de ruissellement et les débits de pointe.

La zone étudiée dans cet essai est située dans l'arrondissement de Socabaya qui se trouve au sud-ouest de la ville d'Arequipa. Bien que Lara ait un système de drainage souterrain élaboré par les Nations Unies lors du projet « Villes durables » (UNSA, 2002), il est difficile de dire si ce système a bien été mis en place, comment et surtout s'il fonctionne.

¹ Le Quechua est la langue des Incas actuellement parlée dans les villes et les villages situés dans les Andes, en Amérique du Sud.

1.2 Objectif

Le but de cet essai est de déterminer si la mise en place de pratiques de gestion optimale (PGO) à la source grâce à des barils de pluie, de la végétation et un stockage temporaire, permet de réduire significativement les volumes de ruissellement ainsi que les débits de pointe sur tout le territoire de Lara. Pour ce faire, un baril de pluie sera installé pour chaque maison ; la végétation des parcs abandonnés sera installée et un stockage temporaire des eaux de pluie sera mis en place sur des terrains de soccer bétonnés.

Comme deuxième objectif, cet essai évaluera la réduction des volumes d'infiltration dans les cours arrière des maisons grâce à la mise en place de barils de pluie.

Les effets de la mise en place des PGO seront mesurés tant à l'exutoire du réseau de drainage urbain déjà conçu pour ce quartier - volumes de ruissellement et débits de pointe, que pour les zones résidentielles - volumes d'infiltration.

1.3 Contenu

Afin d'atteindre les objectifs de cet essai, plusieurs travaux ont été faits. Ils ont été regroupés en 6 chapitres :

Chapitre 1, introduction. Cette section est une mise en contexte de la gestion des eaux pluviales au Pérou. On y trouvera également la définition des objectifs et la description succincte de chaque chapitre de l'étude.

Chapitre 2, la révision de la littérature. Cette section est une compilation des études, des rapports et des articles scientifiques sur la climatologie du Pérou. Cette partie présente aussi le résumé de la gestion des eaux pluviales de ce pays ainsi que les exemples de PGO à la source.

Chapitre 3, description de la zone d'étude. Cette section présente les caractéristiques de l'aménagement de Lara c'est-à-dire la localisation et l'occupation du territoire ; la description de son réseau de drainage urbain ; et la problématique de ce quartier liée à l'eau.

Chapitre 4, les méthodologies de modélisation et d'évaluation. Cette section détaille toutes les étapes de la méthodologie de modélisation hydrologique et hydraulique de Lara ainsi que la description des indices de performance (IP) de chaque PGO mise en place.

Chapitre 5, résultats. Cette section présente les résultats de l'application du modèle de base LARA et du modèle LARA-PGO en utilisant le logiciel SWMM comme interface numérique. Les résultats du modèle LARA-PGO sont regroupés selon des indices de performance : volume de ruissellement, débit de pointe et volume d'infiltration.

Chapitre 6, conclusion. Ce chapitre rappelle les principaux éléments de cet essai, les résultats obtenus, les objectifs atteints, et les recommandations pour des études ultérieures.

2. REVUE DE LA LITTÉRATURE

Cette section présente la compilation des études, des rapports et des articles scientifiques sur la climatologie du Pérou ainsi que le résumé de la gestion des eaux pluviales et les exemples de PGO à la source.

Les points 2.1 et 2.2 sont un aperçu du contexte climatologique du Pérou et plus précisément de la ville d'Arequipa, ainsi que l'état des connaissances des phénomènes météorologiques à fort effet sur les précipitations. Les principaux aspects de la norme péruvienne de drainage urbain sont nommés au point 2.3. Le point 2.4 expose le niveau de maîtrise de la gestion des eaux pluviales dans différentes villes du Pérou, ainsi que des études hydrologiques et hydrauliques de la zone urbaine de la ville d'Arequipa.

Le point 2.5 est une description abrégée des PGO utilisées dans cet essai. Ces PGO sont recommandées par le Guide de gestion des eaux pluviales (MDDELCC, 2010) du Québec et par le guide anglais C635 (Balmforth, et coll. 2006).

2.1 Climat du Pérou

En raison de sa situation géographique, le Pérou a un climat essentiellement tropical avec des pluies abondantes, des températures élevées et une végétation luxuriante. Il est influencé par la présence de divers phénomènes qui déterminent les différents climats du territoire péruvien. Ces éléments majeurs sont : la chaîne de montagnes des Andes, le courant marin péruvien ou l'*Humbolt*, l'anticyclone du Pacifique Sud, le phénomène *El Niño* (ENSO), l'anticyclone de l'Atlantique Sud et le cyclone équatorial.

À cause des Andes, qui traversent le pays du nord-ouest au sud-est, le Pérou a une topographie très variée. Les Andes créent trois régions géomorphologiques (DEB) : la *costa*, la *sierra* et la *selva* (voir annexe B, figure 23).

La *costa* (la côte) est la région située entre la ligne côtière et la partie basse des Andes. Dans l'ensemble, le climat y est sec avec peu de précipitations durant l'année ; exception faite de la côte nord où des pluies diluviennes dépassant les 1000 mm par an peuvent s'abattre lorsque le phénomène ENSO touche cette région (DEB).

La *sierra* (la montagne) est une région située dans les Andes, elle s'étend de la *costa* jusqu'à la *selva*. C'est là que se situe Lara. En raison de l'altitude et de la

topographie irrégulière, la *sierra* présente différents climats allant du tempéré jusqu'au polaire. Les précipitations, qui sont d'origine orographique, se produisent durant l'été austral soit de décembre à mars.

La *selva* (forêt tropicale amazonienne), qui est une région essentiellement constituée de plaines et de pentes douces lorsqu'on se rapproche de l'Atlantique, a une végétation abondante. Cette région a de basses pressions, de l'instabilité atmosphérique ainsi que des vents chauds et humides soufflants du nord et de l'est. Les précipitations dans la *selva* sont plutôt convectives.

2.1.1 Climat de la ville d'Arequipa

La ville d'Arequipa bénéficie pendant l'été de masses humides provenant du Pacifique et de l'Atlantique, ce qui occasionne des précipitations sur les montagnes alentour.

La température et les précipitations varient en fonction de l'altitude, la ville se trouve dans une vallée située entre 2 000 et 2 500 m, entourée de montagnes et de volcans qui atteignent 6 000 mètres d'altitude. La partie inférieure de la ville peut être qualifiée de zone aride et tempérée alors que la partie supérieure a un climat demi-sec froid. Dans les deux cas, il y a un manque de pluie en automne, en hiver et au printemps. La figure 24 de l'annexe B présente ces différents climats.

Les précipitations varient en fonction du climat. Ces dernières ne dépassent pas les 500 mm pour un climat aride alors qu'elles tombent en dessous des 1 000 mm pour un climat semi-pluvieux. Les précipitations annuelles moyennes sont de 700 mm dont 70 % se produisent en été (Cuba, et coll. 2008). La neige tombe parfois pendant les mois d'hiver, de juin à août.

La température moyenne diminue progressivement de 0,6 °C pour chaque 100 m d'altitude. Les écarts de température entre le jour et la nuit sont élevés, ils atteignent 25 °C de différence pendant les mois d'hiver. Les vents soufflent en automne et en hiver avec une vitesse de 72 km/h (Cuba, et coll. 2008).

2.1.2 Phénomènes extrêmes

La ville d'Arequipa est touchée par des phénomènes extrêmes comme l'ENSO et les changements climatiques (CC). La variabilité des effets de l'ENSO sur les précipitations et le débit des rivières de la côte sud du Pérou, y compris de la ville d'Arequipa, rend difficile

d'évaluer les effets des CC sur les périodes humides ou sèches ainsi que sur la quantité de pluie (Her, et coll. 2011).

Les CC pourraient augmenter la température de la ville d'Arequipa sur une altitude supérieure à 3000 m. Les précipitations pourraient diminuer sur une altitude supérieure à 4000 m (2-3 mm/jour de moins que la normale) et augmenter sur une altitude inférieure à 4000 m (1-2 mm/jour de plus que la normale). Sur une altitude inférieure à 4000 m, il y aura de plus longues périodes de sécheresse, combinées à une augmentation de la fréquence de précipitations extrêmes (Her, et coll. 2011).

2.2 Hydrographie

A) *Les bassins versants du Pérou*

Le Pérou compte 52 petits bassins qui coulent vers l'océan Pacifique et deux grands : le bassin endoréique du Titicaca, l'eau de la montagne se déverse dans le lac du même nom à 3800 m d'altitude, et le bassin de l'Amazonie qui coule vers le fleuve Amazone.

B) *Les bassins versants d'Arequipa*

Le territoire de la région d'Arequipa occupe quatre bassins versants qui ruissellent vers l'océan Pacifique. Ces bassins sont, du nord au sud, *Yauca*, *Ocoña*, *Camaná* et *Chili*. La ville d'Arequipa se situe en amont du bassin *Chili* qui a plusieurs sous-bassins. Lara est placée sur le sous-bassin *Andamayo-Tingo Grande*.

C) *Sous-bassin Andamayo*

Le sous-bassin *Andamayo* se définit par la rivière *Andamayo* qui commence sur la partie occidentale des Andes à 4340 m d'altitude. La superficie du sous-bassin *Andamayo* est de 510 km² et son exutoire se situe à la confluence des rivières *Andamayo* et *Postrero* (TYPASA, 2012).

2.3 Approches du drainage urbain au Pérou

Les normes péruviennes du drainage urbain (DU) ont été créées en 1983 avec l'étude « Estudio de la hidrología del Perú ». Plus tard, la création des ouvrages de DU ont pris en compte les règlements du drainage des routes élaborées par le Ministère des Transports et des Communications (MTC). Dans les années 2000, le Ministère du Logement, de la Construction et de l'Assainissement (MVCS), a élaboré la norme OS.060 qui vise à

réglementer la gestion des eaux de pluie en milieu urbain ; en 2014, une nouvelle version de cette norme a été déposée et est toujours en négociation (MVCS, 2014).

2.3.1 Étude de l'hydrologie péruvienne (ILLA)

En 1983 les gouvernements du Pérou et de l'Italie ont étudié l'hydrologie dans tout le Pérou et les résultats de cette étude ont été publiés dans le rapport « Estudio de la hidrología del Perú » en trois volumes, plus connu sous le nom d'étude ILLA (Institut italo-latino-américain).

Le volume 1 de cette étude présente les caractéristiques des précipitations au Pérou, en identifiant les zones pluviométriques typiques. Dans le cas de Lara, la zone pluviométrique typique représentative de la ville d'Arequipa est la zone 5_{a2} (figure 1). Les précipitations maximales cumulées en 24 heures (P_{24h}, équation 1) et les intensités de pluie maximales (I, équation 2) pour chaque zone ont été formulée en fonction de la fréquence de récurrence des pluies (T), la durée des pluies (d), de l'altitude, de la localisation de la zone par rapport à l'océan Pacifique et par rapport aux Andes, et d'autres paramètres adimensionnels.

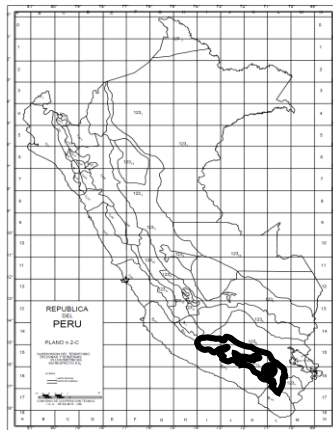


Figure 1. Zones pluviométriques du Pérou, étude ILLA (MVCS, 2014)
 ● Zone d'étude (zone pluviométrique : 5_{a2})

Équation 1 $P_{24h,T} = \epsilon_g(1 + K \times \log T)$

- P_{24h, T} Précipitation maximale cumulée en 24 heures (mm) pour une fréquence T
- ε_g Paramètre adimensionnel, ville d'Arequipa : 31,3805 (annexe A, tableau 18)
- K Paramètre adimensionnel de fréquence, ville d'Arequipa : 0,005 (annexe A, tableau 18)
- Fréquence (ans)

Équation 2 $I_{d,T} = a(1 + k \times \log T) \times (d + b)^{n-1}$

$I_{d,T}$	Intensité de pluie (mm/h) pour une durée de pluie d et une fréquence T
d	Duration de pluie (h), $t < 3$ h
a	Paramètre adimensionnel d'intensité, ville d'Arequipa : 13,827 (annexe A, tableau 19)
b	Paramètre du temps (h), ville d'Arequipa : 0,4 h (MVCS, 2014)
n	Paramètre adimensionnel du temps, ville d'Arequipa : 0,303 (annexe A, tableau 19)

2.3.2 Norme péruvienne de drainage urbain OS.060

Cette norme vise à établir les critères de conception des projets de DU, c'est-à-dire la mise en place des ouvrages qui répondent aux fonctions suivantes : recueillir, transporter et éliminer les eaux de pluie qui tombent sur une zone urbaine.

Selon la norme OS.060, les zones urbanisées avec une pluie P_{24h} habituelle et supérieure à 10 mm devront avoir un réseau DU (MVCS, 2006). Les pluies de basse fréquence ($T < 25$ ans) seront drainées en surface ou de manière sous-terrain. Les pluies de fréquence modérée ou élevée ($T \geq 25$ ans) seront drainées via les rues, les canaux de surface et d'autres ouvrages de surface. Les phénomènes météorologiques extrêmes comme l'ENOS ou les CC sont absents de la norme.

La norme cite de façon brève la mise en place des PGO à l'émissaire — bassins de rétention de façon temporelle, ou à la source - puits percolant pour favoriser l'infiltration. Le contrôle de la qualité des eaux n'est pas précisé.

2.4 État de l'art du drainage pluvial au Pérou

Ce point survole le niveau de maîtrise du DU péruvien, depuis les temps préhispaniques — culture inca, aux expériences les plus récentes concernant la ville de Sullana située dans la région *costa* au nord du Pérou et la ville de Cuzco qui se trouve, elle, dans la région *sierra* au sud du pays. En ce qui concerne Lara, il existe déjà une étude — niveau de faisabilité — des solutions pour les zones à risques d'inondations d'origine pluviale, cette étude a été élaborée par l'université nationale de San Agustín (UNSA) et l'agence de protection civile (INDECI) en 2002 (Málaga, et coll. 2002). Ce rappel du niveau de maîtrise du DU péruvien constituera un cadre de référence important pour la modélisation hydrologique et hydraulique de Lara.

2.4.1 DU au temps des Incas

Les peuples incas vivant au Pérou dans la région *costa* et *sierra*, ainsi qu'en Bolivie dans la région *sierra* ont développé une expertise de la gestion de l'eau. Au cours du XVI^e siècle, les ingénieurs hydrauliques incas ont mis au point des technologies malgré des conditions difficiles : géographie escarpée, sources d'eau éloignées, fortes pluies, torrents et glissements de terrain. L'ingénieur Kenneth Wright (Wright, et coll. 2000) a étudié cette ingénierie hydraulique dans la citadelle du Machu Picchu située dans les montagnes de la région de Cuzco.

Un des critères de conception de DU de la citadelle visait à augmenter l'infiltration des précipitations et donc de réduire le ruissellement de surface : les Incas connaissaient déjà les directives des PGO. Ceci a été possible grâce à la construction d'*Andenes* (photo 1 et figure 2), terrasses dont les fonctions sont multiples : réduire le ruissellement de surface en augmentant l'infiltration par des bandes de végétation filtrante ; prévenir la perte de sol en contrôlant l'érosion ; éviter les changements de température en exerçant un contrôle sur la météorologie ; et enfin, augmenter les espaces agricoles pour des raisons économiques.

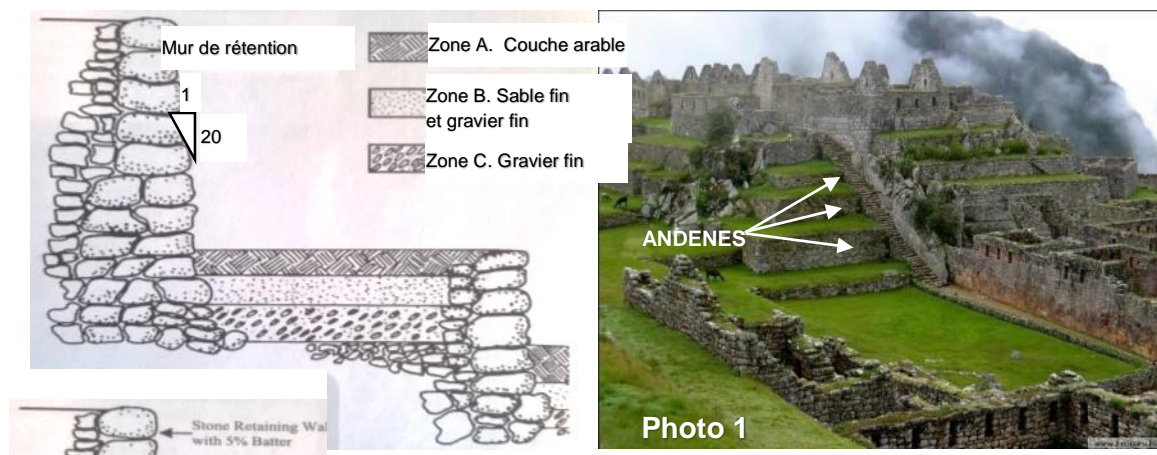


Figure 2. Schéma d'un « Anden », citadelle de Machu Picchu (Wright, et coll. 2000)

Photo 1. « Andenes » urbaines dans la citadelle Machu Picchu (Oquendo, 2010)

La modélisation hydraulique des réseaux d'aqueducs et des réseaux de DU faisaient partie de la conception et de l'aménagement urbain au temps des Incas. Des chercheurs comme Federico Kauffman Doig et Brien Foerster (Andrews, 2012) assurent que le bloc sculpté appelé *Monolito Sayhuite* (photo 2), situé dans la région d'Apurimac, était une maquette de réseaux d'aqueducs et de réseaux de DU d'une ville inconnue.



Photo 2. «Monolito Sayhuite» (Ancajima Ojeda 2013)

2.4.2 DU : Cas de la ville de Sullana

Sullana est une ville dans le nord-ouest du Pérou, dans la région *costa*, sur la rive droite de la rivière *Chira*. Elle se situe à 60 m d'altitude. Sullana est vulnérable aux inondations causées par les fortes pluies du phénomène ENSO et par l'expansion urbaine sur les lits des rivières et des ruisseaux à sec.

Après l'ENSO de 1983 (photo 3), des réseaux de canaux, des conduites et des canaux-voies ont été construits pour transporter les eaux de pluie à travers la ville jusqu'à l'intercepteur *La Quebrada*, qui a été conçu comme un canal et une voie de transport (photo 4), et qui déverse ces eaux dans la rivière *Chira* (Sullana, 2009).

Les canaux-voies ont trois fonctions (Cumpa, 2002) : voie de transport par temps sec, voie de transport contrôlé lors d'averses et canal des eaux pluviales en cas d'orages. L'inconvénient de ces constructions survient quand la pente du canal-voie est faible, comme c'est le cas de la ville de Sullana avec des pentes de 1,5 % et que les quantités d'eau sont importantes. Des études (García, 2008) montrent que la pente minimale des canaux-voies devrait être supérieure à 4 %. Or, pendant l'ENSO de 1988, avec une P_{24h} de 210 mm (Sullana, 2009) et des intensités de précipitations entre 86 et 96 mm/h (Granda, 2013), la capacité hydraulique du canal-voie *La Quebrada* a été dépassée et a provoqué des inondations dans les bidons-villes voisins.



Photo 3

Photo 3. Ruisseau « La Quebra



Photo 4

El Niño 1983 (Sullana, 2009)

Photo 4. Canal-voie « La Quebrada » (Sullana, 2009)

2.4.3 DU : Cas de la ville de Cusco

Cusco est une ville située dans une vallée au sud-est du Pérou dans la *sierra*, à 3 400 m d'altitude. Cette ville est vulnérable aux inondations et aux torrents en raison des fortes précipitations, de sa géographie escarpée et de la mauvaise gestion des eaux pluviales.



Photo 5. Déchets dans les réseaux de DU de la ville de Cuzco (Cusco Portada, 2015)

L'article « Rainfall Drainage : A case study of Cusco City » (Camino, 2002) présente l'évaluation hydraulique du DU de la ville de Cusco. Les résultats montrent que certains réseaux pluviaux sont employés comme réseaux sanitaires, c'est-à-dire comme drainages unitaires. Cela est dû à la croissance rapide de la ville et au manque d'aménagement urbain. Camino a signalé que 63 % des bouches et des regards d'égout étaient en mauvais état en raison de l'accumulation de sédiments et de déchets (photo 5).

2.4.4 DU : Ville d'Arequipa et quartier de Lara

Au début des années 2000, les Nations Unies (NU) ont conduit plusieurs études au Pérou, comme dans la ville d'Arequipa, afin de réduire les niveaux de risque des villes à cause de

phénomènes naturels tels que les séismes, les inondations et les glissements de terrain (INDECI, 2002). Les NU ont réalisé trois études à Lara : CEREN-pluviométrie, CEREN-zones à risques et CEREN-Lara.

A) Étude CEREN — Pluviométrie

L'étude CEREN – Pluviométrie (UNSA, 2001a) décrit l'hydrologie de la pluie qui tombe dans le réseau de DU de la ville d'Arequipa, ce réseau est formé de six canaux en surface, appelés *torrenteras*. La pluie qui tombe dans la *torrentera Paucarpata* - canal à proximité de Lara, est décrite par l'équation 3 (station pluviométrique *Socabaya*) et l'équation 4 (station pluviométrique *La Pampilla*), les deux équations sont fonction de T (ans) et de la pluie P_{24h} (mm).

$$\text{Équation 3} \dots\dots\dots \frac{1}{T} = 2,69444 * 0,91945^{P_{24h}}$$

$$\text{Équation 4} \dots\dots\dots \frac{1}{T} = 931,99781 * P_{24h}^{-2,75532}$$

B) Étude CEREN — zones à risques

L'étude CEREN-zones à risques (UNSA, 2001b) identifie dans la ville d'Arequipa huit zones urbaines à risque sujettes aux glissements de talus, aux inondations et aux séismes. L'une de ces zones est Lara, qualifiée par l'étude de zone à risques élevés où les inondations et la manque de drainage urbain peuvent conduire au phénomène de liquéfaction du sol.

C) Étude CEREN — Lara

L'étude CEREN-Lara (UNSA, 2002) propose la mise en place d'un système de DU sous-terrain et le renforcement structural des bâtiments à risque. L'étude présente l'analyse hydrologique de la pluie ainsi que la classification des sols du territoire. Le DU proposé a des grilles pluviales transversales à la chaussée qui achemine les eaux pluviales vers des collecteurs. Ces collecteurs transportent les eaux jusqu'à l'exutoire *Chilpinilla* où se trouve le canal *Chilpinilla* qui fait office de milieu récepteur.

2.5 Pratiques de gestion optimale (PGO) à la source

Les objectifs quantitatifs de la mise en place de PGO sont la réduction des volumes et des débits de ruissellement et l'augmentation des volumes d'infiltration dans les sols. Ces PGO peuvent être implantés soit à la source du ruissellement soit à mi-chemin du transport des eaux pluviales soit avant d'arriver au milieu récepteur.

Lara est un secteur urbain en développement qui n'a pas les ressources économiques pour mettre en œuvre de coûteuses PGO. Par conséquent, modifier ou amplifier le réseau de DU déjà existant est irréalisable. C'est à cause de cela que les PGO proposées doivent être simples et abordables comme c'est le cas des PGO à la source. Cet essai propose la mise en place de ces dernières : barils de pluie, végétation, et stockage temporaire dans les terrains sportifs.

A) *Barils de pluie*

La mise en place des barils de pluie a pour objectif de retenir et de stocker les eaux pluviales s'écoulant des toits des maisons afin de les réutiliser. Notons que l'eau ainsi recueillie sera impropre à la consommation humaine. L'utilisation de barils vise non seulement à réduire le volume et le débit de ruissellement dans les rues de Lara, mais encore, dans le cadre de cet essai, à diminuer le volume d'infiltration, contrairement aux PGO traditionnelles, dans les jardins placés à l'arrière des maisons. Chaque maison aura un baril dont la capacité ne devra pas dépasser un volume de 250 L soit approximativement 66 gallons.

B) *Végétation*

Dans le cas de sols nus, comme des parcs abandonnés, la végétation peut réduire les volumes et les débits de pointe des eaux pluviales grâce aux phénomènes d'infiltration et d'évapotranspiration. Dans le cas de l'infiltration, la couverture végétale peut augmenter entre 1.1 et 7 fois les valeurs de la capacité d'infiltration (f) des sols nus (Viessman, et coll. 2003).

C) *Stockage temporaire*

Certains terrains peuvent stocker les eaux pluviales de façon temporaire avec des conséquences mineures. Le guide C635 (Balmforth, et coll. 2006) recommande de stocker les eaux pluviales dans des terrains récréatifs tels qu'un terrain de soccer bétonné, jusqu'à une hauteur maximale de 0,5 m pour des pluies T<30 ans.

3. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Ce chapitre présente les caractéristiques de l'aménagement de Lara — localisation et occupation du territoire ; la description du réseau de DU existant de même que la problématique de ce quartier liée à l'eau.

3.1 Localisation

Lara est située dans le quartier du même nom qui se trouve dans l'arrondissement de Socabaya, à 12 km au sud-ouest du centre-ville d'Arequipa, au sud du Pérou (figure 3). Lara est placée dans une vallée située à 2 310 m d'altitude et est entourée de montagnes rocheuses qui font partie des Andes. Lara est délimitée par les avenues *Las Peñas* à l'ouest, *Paisajista* au nord-ouest, *Salaverry* au nord-est et par des champs agricoles au sud (figure 4), soit une surface de 61,60 ha. Lara reçoit les eaux pluviales des zones urbanisées voisines qui sont situées au nord et à l'est.

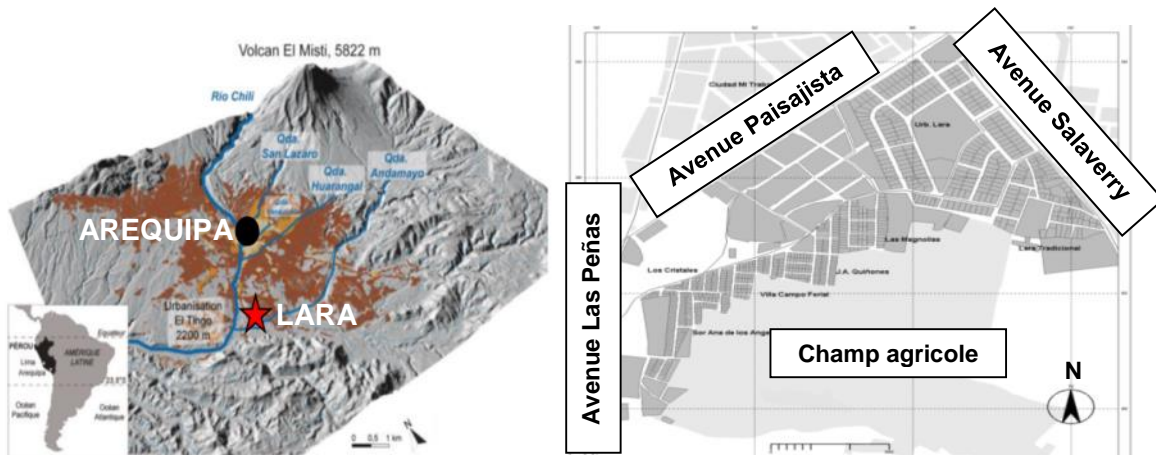


Figure 3. Localisation de Lara (Ettinger, et coll. 2015)

Figure 4. Délimitation de Lara (UNSA, 2002)







3.2 Occupation du territoire

La description de l'occupation du territoire de Lara est basée sur l'étude CEREN-Lara qui couvre 60 % de la superficie totale et de l'inspection virtuelle de Lara avec le logiciel Google earth (GE, 2015). Lara compte quatre types d'occupation : résidentiel de type 1 et 2, il s'agit de maisons d'un ou de deux étages ; récréatif tels que des parcs et des installations sportives extérieures ; zones abandonnées, par exemple, des parcs à sol nu ; et enfin des champs agricoles.

Les pourcentages des surfaces imperméables et perméables des zones résidentielles sont déterminés en fonction de la surface de chaque parcelle, des surfaces construites et du nombre d'étages de chaque maison. Pour les parcs et les champs agricoles, la quasi-totalité des surfaces (90 %) est perméable, quant aux parcs abandonnés, la totalité des surfaces est perméable. Les terrains de soccer sont des terrains de jeu en béton entouré de gazon.

La répartition du territoire de Lara est marquée par la présence de résidences de type 1 - 53 % de la surface totale ; par contre les terrains de soccer sont les zones qui occupent le moins de territoire — moins de 2 % de la surface totale. Le tableau 1 et la figure 5 montrent l'occupation et la distribution du territoire de Lara.

Tableau 1. Occupation de territoire de Lara

Zone	Couleur	Surface totale (ha)	Surface par lot (m ²)	E.C par lot (m ²)	# Étages	% IMP	% PERM
Résidentielle 1		32,19	387	180	<1-2>	31	69
Résidentielle 2		9,41	184	60	1	45	55
Parcs		5,71	-	-	-	10	90
Champs agricoles		10,12	-	-	-	10	90
Parcs abandonnés		3,17	-	-	-	0	100
Terrains de soccer		1,00	-	-	-	75	25

% IMP : Pourcentage de surface imperméable
E.C: Espace construit par lot ou parcelle

% PRM : Pourcentage de surface perméable

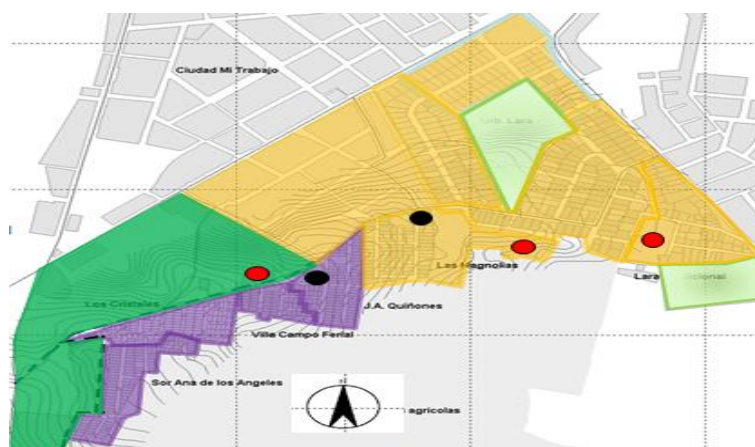


Figure 5. Distribution spatiale de l'occupation du territoire de Lara

3.3 Réseau de drainage urbain

Un réseau sous-terrain de drainage urbain (DU) a été conçu pour capturer et transporter les eaux pluviales de Lara et du quartier voisin Simon Bolivar. Les eaux de pluie ruisselantes sont transportées par le réseau vers le canal ouvert *Chilpinilla* (milieu récepteur). Le réseau de DU de Lara peut transporter un débit maximal de $4,88 \text{ m}^3/\text{s}$ ($T=45$ ans).

Le DU de Lara a des grilles pluviales métalliques placées de façon transversale à la chaussée (photo 6) qui rejoignent les canaux souterrains qui sont des collecteurs de béton armé de section rectangulaire variable. Ces collecteurs conduisent les eaux pluviales vers le canal intercepteur en béton armé de section rectangulaire. L'intercepteur transporte les eaux vers le canal ouvert *Chilpinilla*. Tout au long du réseau se trouvent des regards d'égout.

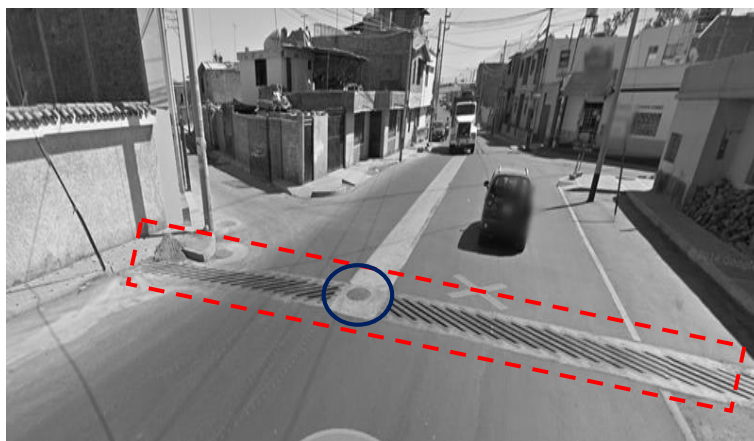


Photo 6. Grilles métalliques et regard d'inspection

Le réseau de DU de Lara a trois collecteurs (C1, C2 et C3) et un intercepteur (I-AA) : C1 part du nord-est de Lara. Son canal souterrain mesure 1 m de large (L) sur 1 m de haut (H) et couvre une distance de 950 m. Sa pente est en moyenne de 1,57 %. C1 a deux tronçons : *Salaverry Alto* (C1-SA) et *Parque Lara* (C1-PL).

C2, lui, part du sud-est de Lara. Ses canaux souterrains mesurent 1 m de large (L) sur 1 m de haut (H) et 1,2 m de large (L) sur 1,2 m de haut (H). Ils se déploient sur 1 147 m et ont une pente moyenne de 1,08 %. Il y a quatre tronçons : *Salaverry Bajo Norte* (C2-SBN), *Salaverry Bajo Sur* (C2-SBS), *Pasaje Tingo Este* (C2-PTE) et *Pasaje Tingo Oeste* (C2-PTO).

Enfin, C3 part de l'interception entre C1 et C2 et continue sur l'avenue *Ariaz Araguez*. Son canal souterrain mesure 1,2 m de large (L) sur 1,2 m de haut (H). Il fait 498 m de long et a une pente moyenne de 1,54 %.

C'est au bout de C3 que se trouve l'intercepteur (I-AA) qui continue sur l'avenue *Ariaz Araguez* jusqu'au canal ouvert *Chilpinilla* (milieu récepteur). I-AA est un canal souterrain qui mesure 1,5 m de large (L) sur 1,5 m de haut (H). D'une longueur de 445 m, sa pente moyenne est de 1,54 %. À l'inverse des collecteurs, l'intercepteur n'a pas de grilles pour capturer les eaux pluviales ruisselantes. La figure 6 montre le schéma du DU de Lara.

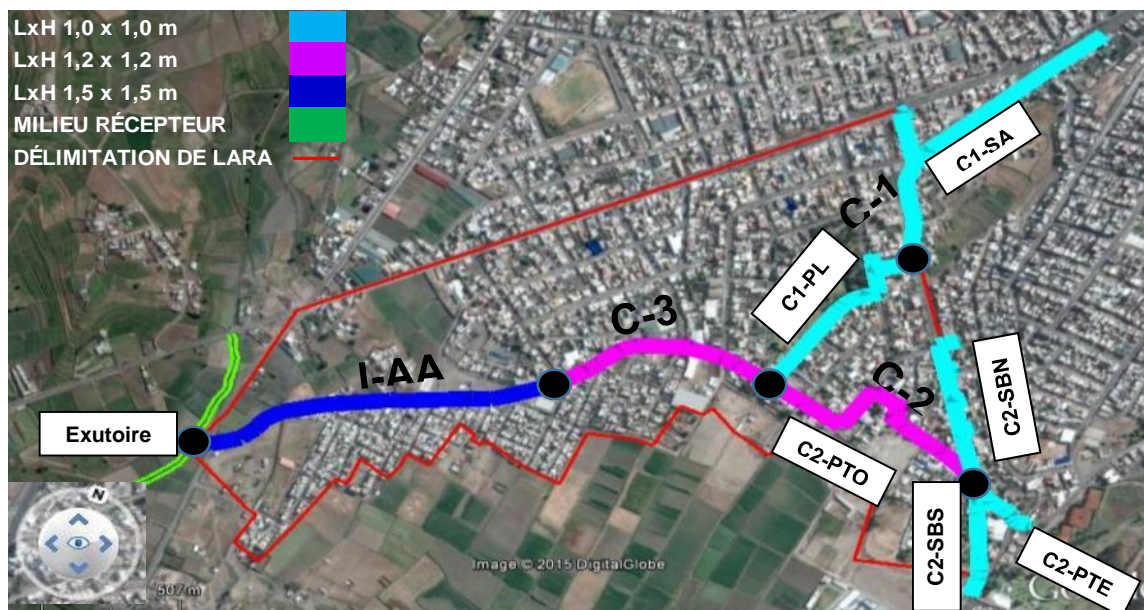


Figure 6. Réseau du DU conçu pour Lara

3.4 Problématique de Lara liée aux eaux pluviales

L'étude CEREN-Lara met en évidence plusieurs problèmes liés à l'eau de pluie qui mettent en danger la zone urbaine de Lara et qui sont directement liés à trois paramètres hydrologiques : le ruissellement en surface, le débit à la fin du réseau de drainage et l'infiltration.

A) *Ruissellement en surface*

L'insuffisance du nombre d'égouts et de collecteurs pluviaux dans les rues de Lara cause des inondations. Plusieurs maisons déversent directement leurs eaux pluviales sur les trottoirs et les chaussées — avec des tuyaux qui sortent des toits, ce qui augmente le volume d'eaux de ruissellement en surface (photo 7).

B) Débits à la fin du réseau de drainage

La réduction des zones agricoles et la croissance des zones urbaines à Lara produisent un volume de ruissellement plus important et augmentent le temps de concentration (t_c). En conséquence, il s'ensuit une augmentation du débit de pointe à l'exutoire du réseau de drainage de Lara. L'exutoire déverse ses eaux vers la *torrentera Paucarpata*, appelé aussi canal *Chilpinilla*. Or, la situation de ce canal est déjà critique à cause des apports de sédiments en amont et des constructions précaires de plus en plus nombreuses dans son lit (UNSA, 2001a).



Photo 7. Drainage pluvial du toit de résidence typique (GE, 2015)

C) L'infiltration

Le sol sur lequel reposent les fondations des maisons de Lara peut perdre de sa portance dû au phénomène de liquation des sols (UNSA, 2002). Ce phénomène est associé aux sols granulaires, à la présence élevée de nappes phréatiques et aux vibrations subites du sol telles que celles subies lors d'un séisme. Le manque de drains dans les fondations des maisons ainsi que le déversement d'une partie des eaux pluviales des toits vers les jardins gazonnés situés dans la cour arrière augmentent les chances de voir ce phénomène apparaître.

4. MÉTHODOLOGIE DE MODÉLISATION ET D'ÉVALUATION

Ce chapitre détaille toutes les étapes de la méthodologie de modélisation hydrologique et hydraulique du DU de Lara ainsi que la description des indices de performance (IP) de chaque PGO mis en place.

4.1 Modèle macroscopique

Les modèles de type macroscopique tentent de décrire le système en termes de bilan de phénomènes dans les réservoirs (Lagacé, 2016). Chaque sous-bassin de Lara a des phénomènes qui sont représentés par une variable d'entrée : précipitation (P) ; par des variables de sortie : évapotranspiration (ETP), infiltration (I), ruissellement (R) ; et par une variable de rétention : stockage (STK). Pour les modèles que nous allons étudier, ETP sera considérée comme nulle dû au manque d'information. Les variables du modèle macroscopique sont montrées à la figure 7.

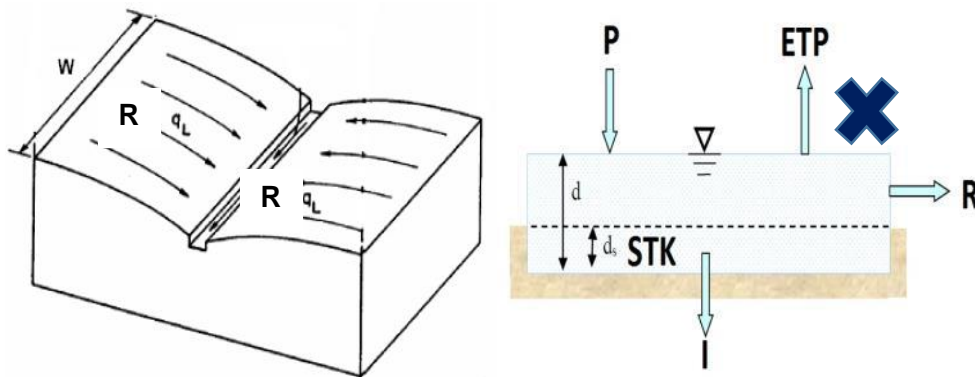


Figure 7. Modèle macroscopique des sous-bassins, adapté (Rossman, et coll. 2016)

Ce modèle macroscopique est la base pour les modèles étudiés dans cet essai auxquels s'appliquent les hypothèses suivantes :

- Les sous-bassins (SB) sont des agglomérations d'îlots avec le même type d'occupation du territoire.
- La pluie tombe seulement sur la zone d'étude (Lara) et elle est uniforme dans tous les sous-bassins.
- Les rues délimitent les SB et elles déterminent la direction du ruissellement vers les nœuds du collecteur pluvial.
- En absence de rue entre SB, les eaux de ruissellement du SB en amont coulent vers le SB en aval.

4.1.1 Précipitation pluviale

La pluie pour les modèles hydrologiques est fonction de sa fréquence de retour (T), de sa durée (d), et de son intensité (i). Les valeurs de ces trois paramètres sont tirées de la lecture des courbes intensité-durée-fréquence (IDF). Une pluie de longue durée (P_{24h}) est fonction de T. Chaque paramètre sera montré de façon détaillée plus loin.

A) Fréquence de retour « T »

Le choix de T pour la pluie à modéliser est fonction du type de PGO à la source et du seuil proposé par l'étude CEREN-Lara (T= 45 ans). Le DU de Lara est basé sur des conduits fermés souterrains. Par conséquent, ce DU peut être classé comme réseau mineur (Rivard, 2005), d'où des valeurs de T associés à ce réseau pouvant atteindre les 2, 5 voire 10 ans au maximum (MDDELCC, 2010). Les valeurs de T prises pour les pluies à modéliser sont de 2, 5 et 50 ans.

B) Durée de la pluie « d »

La distribution temporelle des pluies est liée à la durée d de celles-ci. Les débits maximaux de ruissellement de pluie sont associés au temps de concentration t_c de la pluie à Lara (comme sous-bassin). Celui-ci est égal à la somme du temps d'entrée t_i de la goutte de pluie qui a ruisselé de la parcelle la plus éloignée de Lara jusqu'au conduit du réseau de drainage le plus proche (conduit C1-SA). Il faut ajouter à t_i le temps de transport t_τ des eaux canalisées jusqu'à l'exutoire c'est-à-dire le canal *Chilpinilla*.

En utilisant l'équation 5 avec C=0.95 pour la surface imperméable en béton de la maison la plus éloigné, L_t =9,3 m la largeur du toit et S_t=0.5% la pente du toit qui est la valeur minimale supposée pour les toits plats ; on obtient la valeur t_i qui est égale à 1,87 minute.

$$\text{Équation 5} \dots\dots\dots t_i = \frac{3,26 \times (1,1 - C) \times L_t^{0,5}}{S_t^{1/3}} \quad (\text{Rivard, 2005})$$

Le temps de transport t_τ peut être obtenu en adaptant l'équation de Manning (Équation 6). Cette équation a été appliquée au réseau de DU de Lara avec le débit de conception. Les détails des valeurs de t_τ pour chaque conduit du réseau sont montrés dans le tableau 20 de l'annexe A. La valeur de t_τ obtenu est égale à 8,24 minutes.

$$V = \frac{R^{2/3} \times S^{1/2}}{n}, \quad V = \frac{L_C}{t_T} \quad (\text{Rivard, 2005})$$

$$\text{Équation 6} \dots\dots\dots t_T = \frac{L_C \times n}{R^{2/3} \times S^{1/2}}$$

La somme des valeurs de t_i et t_r donne un temps de concentration t_c de 10.11 minutes. Il est intéressant de noter que t_i atteint presque 18 % de la valeur totale de t_c . L'étude CEREN-Lara a obtenu une valeur t_c de 2 heures pour le réseau de drainage. Face à cette différence, la valeur de d à modéliser pour obtenir le débit de pluie maximale sera de 1 heure. Selon les recommandations du guide des eaux pluviales du Québec (MDDELCC, 2010), pour obtenir les volumes maximaux de ruissellement de pluie, la valeur de d devra être de 24 heures.

C) Hauteurs de pluie

Courbes IDF

Les courbes d'intensité-durée-fréquence (IDF) ont été obtenues à partir de l'équation 2 et des valeurs du tableau 2.

Tableau 2. Paramètres des courbes IDF-Lara

Paramètre		Valeur
Zone pluviométrique		5a2
Paramètre d'intensité	a	13,32 mm
Paramètre de fréquence	K	0,607
Période de retour	T	2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans
Durée de la pluie	t	0 - 3 heures
Paramètre régional (Montagne)	b	0,4
Paramètre adimensionnelle	n	0,301

Les valeurs du tableau 2 ont donné comme résultat des intensités $i = 15,24$ mm/h ($T= 2$ ans), $i = 17,79$ mm/h ($T= 5$ ans) et $i = 24,17$ mm/h ($T= 50$ ans) pour des pluies de $d= 1$ heure. La figure 8 montre les courbes IDF de Lara pour des pluies de 0 à 3 heures.

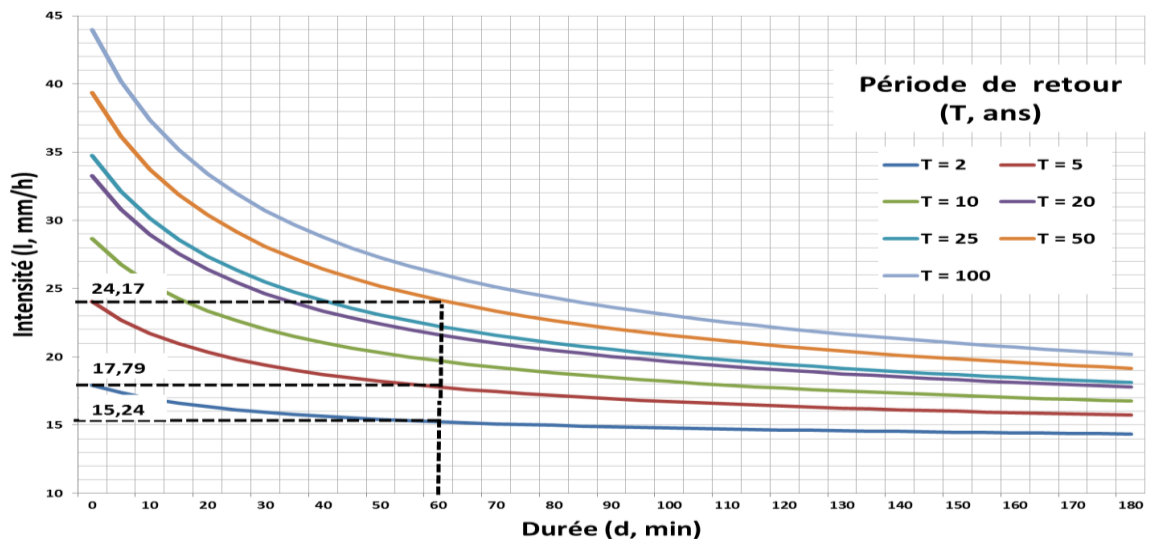


Figure 8. Courbes IDF de la zone d'étude

P_{24h}

Pour les pluies de d= 24 h, les modèles hydrologiques peuvent fonctionner avec le volume des pluies obtenu à partir des données mesurées par le pluviomètre *Socabaya* (équation 3) ou le pluviomètre *La Pampilla* (équation 4), ou encore avec celui obtenu lors de l'étude ILLA (équation 1). Les valeurs de P_{24h} pour les différentes fréquences de récurrence (T) sont montrées à la figure 9.

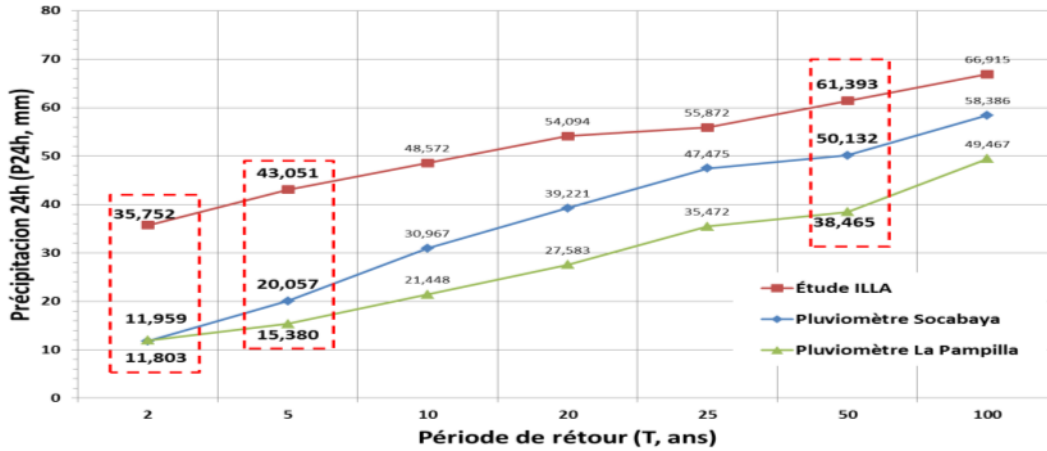


Figure 9. P_{24h} vs. T

Les P_{24h} obtenus à partir de l'étude ILLA représentent la pluie pour des altitudes comprises entre 2 000 et 6 000 m pour une zone plus vaste que celle de Lara, plus grande en fait que la ville d'Arequipa. À cause de cela, les valeurs de P_{24h} ainsi obtenues dessinent une tendance, mais il reste à valider ces chiffres.

Le pluviomètre *La Pampilla* est situé à 2 400 m d'altitude, 6,2 km en amont de Lara ; quant au pluviomètre *Socabaya*, il est lui situé à 2 277 m d'altitude, à 1,4 km en aval de Lara. Les P_{24h} obtenus du pluviomètre *La Pampilla* contredisent la relation altitude-précipitation des pluies d'origine orographique – plus on monte en altitude, plus y il a de la pluie. D'autre part, les P_{24h} du pluviomètre *La Pampilla* sont inférieures à celles obtenues avec le pluviomètre *Socabaya*.

Les valeurs de P_{24h} utilisées dans l'essai seront celles obtenues par le pluviomètre *Socabaya* soit 11,96 mm (T= 2 ans), 20,06 mm (T= 5 ans) et 50,13 mm (T= 50 ans).

D) Patron de pluie (hyetogramme)

Pluie d= 1 h

En raison du manque de patron de pluie représentatif de Lara, le patron de pluie pour une durée d'une heure a été obtenu à partir des courbes IDF de Lara (figure 8) et l'utilisation de la méthode du bloque alterne (Chow, et coll.1994) qui est recommandée par la norme péruvienne OS.060 (MVCS, 2014). La figure 10 montre les hyetogramme pour les pluies de durée (d) égale à 1h et des fréquences de retour (T) égales à 2, 5 et 50 ans. Les détails de calcul de chaque patron de pluie sont illustrés dans le tableau 21 de l'annexe A.

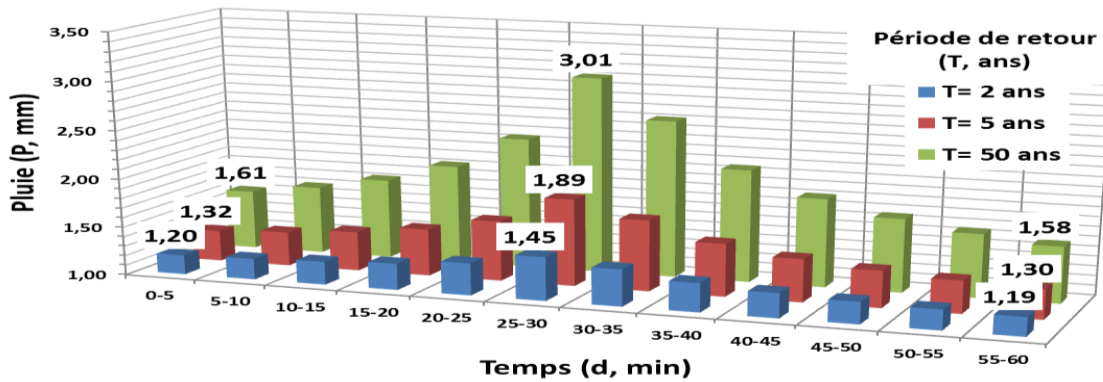


Figure 10 Hyetogrammes d=1h, T= 2, 5 et 50 ans

Pluie d= 24 h

Le patron de pluie pour une durée de 24 heures a été obtenu à partir des valeurs de P_{24h} soit respectivement 11,96, 20,06 et 50,13 mm. La méthode employée pour obtenir le patron de pluie a été celle de la pluie triangulaire asymétrique qui est recommandée par la norme péruvienne OS.060 (MVCS, 2014). La figure 11 montre les hyetogramme pour les pluies de durée (d) égale à 24h et des fréquences de retour (T) égales à 2, 5 et 50 ans.

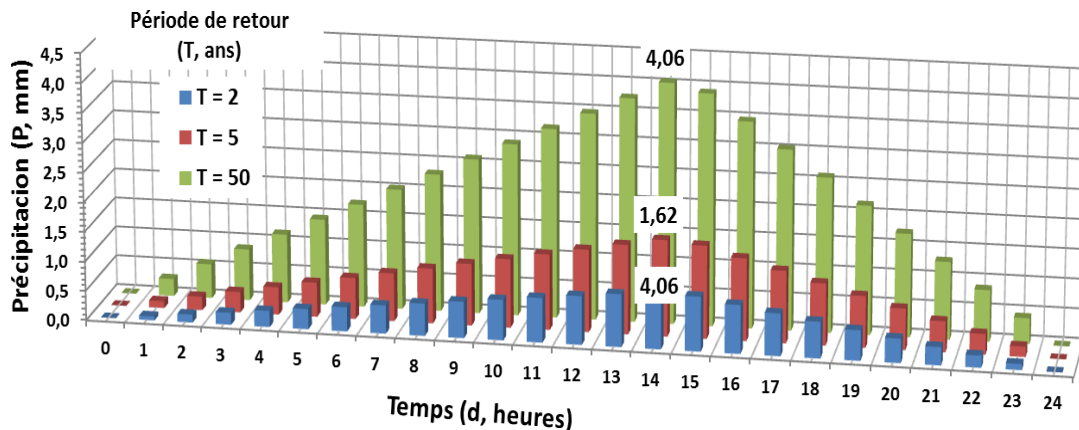


Figure 11 Hyetogrammes d=24h, T= 2, 5 et 50 ans

4.1.2 Infiltration

L'infiltration du sol est définie par des paramètres comme le taux d'infiltration f (mm/h), la masse infiltrée F (mm) et la capacité d'infiltration initiale f_{MAX} (mm/h). Ces paramètres dépendent du type de sol.

L'étude CEREN-Lara indique la présence de quatre types de sols. Il s'agit des boues telles que l'argile, le sable et le gravier ; des sols agricoles comme les sables, les limes et le matériel organique ; des sables fins ainsi que des sables graveleux. Cette étude n'a pas d'informations pertinentes relatives aux paramètres d'infiltration. Il a donc fallu chercher dans la littérature des valeurs représentatives des paramètres de ces quatre sols.

A) *Méthode de Horton*

Les modèles hydrologiques de cet essai vont utiliser la méthode de Horton comme méthode d'infiltration qui est la plus courante en hydrologie urbaine (MDDELCC, 2010). Horton explique que si la pluie excède une capacité d'infiltration (f), il survient alors un processus d'abattement exponentiel. L'équation 7 montre le calcul de la capacité d'infiltration (f), où chaque paramètre est associé à un type de sol et à un type de couverture en surface.

Équation 7 $f = f_{MAX} + (f_{MAX} - f_0) \times e^{kt}$ (MDDELCC, 2010)

Capacité d'infiltration ultime (f_0)

La valeur du paramètre f_0 est similaire à la conductivité hydraulique saturée (K_s) si les propriétés des sols sont homogènes dans les trois dimensions. Selon les types de sols indiqués dans l'étude CEREN-Lara, les valeurs de K_s (figure 12) pourraient se placer entre 360 mm/h (10^{-4} m/s) et 0,036 mm/h (10^{-8} m/s).

K (m/s)	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}
Types de sols	Gravier sans sable ni éléments fins			Sable avec gravier, Sable grossier à sable fin		Sable très fin Limon grossier à limon argileux			Argile limoneuse à argile homogène		
Possibilités d'infiltration	Excellentes			Bonnes		Moyennes à faibles			Faibles à nulles		

Figure 12. Gamme de valeurs de K_s de Lara (MDDELCC, 2010)

Cet éventail de valeurs de K_s montre que la perméabilité du sol de Lara peut être bonne, moyenne ou faible. Pour cet essai, la valeur de K_s utilisé pour tous les sols de Lara sera de 3,3 mm/h soit approximativement 10^{-6} m/s.

Capacité d'infiltration initiale (f_{MAX})

Les valeurs de f_{MAX} sont liées au type de sol, à l'humidité initiale et à la couverture végétale. Pour les surfaces perméables (SP) avec de la végétation telles que les parcs, les zones résidentielles et les champs agricoles ; la valeur de f_{MAX} sera de 152,4 mm/h. En revanche, concernant les SP sans végétation, elle sera de 76,2 mm/h. Ces valeurs sont extraites du manuel de référence SWMM (Rossman et coll., 2016).

Taux de décroissance (k)

Ce paramètre dépend de l'humidité initiale du sol. Il peut varier entre 3 et 5 h^{-1} (Rossman et coll., 2016). La valeur de k sera de 5 h^{-1} pour tous les sols de Lara.

4.1.3 Stockage et ruissellement

Stockage

Dans le modèle macroscopie de sous-bassin de Lara (figure 7), une partie des précipitations qui tombent dans les sous-bassins est retenue par la végétation et d'autres éléments à la surface des zones perméables et imperméables jusqu'à ce que débute l'évaporation. Cela est représenté par le volume d'eau stocké dans les surfaces perméables (d_p) et imperméables (d_i).

Les valeurs d_i pour toutes les zones imperméables sont de 1,905 mm. Les valeurs d_p pour tous les sols engazonnés comme les parcs, les zones résidentielles ainsi que les terrains de soccer sont de 3,381 mm. Finalement, les valeurs d_p pour les champs agricoles sont de 5,08 mm. Ces valeurs sont extraites du manuel du logiciel SWMM 5.1. (Rossman et coll., 2015).

Ruissellement

Le ruissellement de la pluie dans les sous-bassins de Lara est considéré comme un écoulement uniforme dans un canal rectangulaire — le sous-bassin, de largeur W. La méthode de Manning est utilisée pour estimer le débit par unité de surface q.

Équation 8 $q = \frac{W \times S^{1/2}}{A \times n} \times (d - STK)^{5/3}$ (Rossman et coll., 2016).

Les paramètres A (surface), W (largeur) et S (pente) sont les paramètres géométriques de chaque sous-bassin. Les valeurs de S pour les sous-bassins résidentiels sont associées aux pentes des toits qui sont presque horizontaux, c'est-à-dire d'environ 0,5 %.

Le paramètre d (hauteur d'eau) est le résultat du bilan de conservation de masse des phénomènes suivants : précipitations, infiltration, évapotranspiration - ici nulle, et le ruissellement. Le paramètre n (coefficient de Manning) dépend de la couverture du sol. Pour les besoins de l'essai, ce paramètre prend les valeurs suivantes : 0,012 (béton lisse) pour les surfaces imperméables (SI) les parcs et les terrains de soccer ; 0.013 (béton ordinaire) pour les SI des zones résidentielles ; 0,017 pour les surfaces perméables (SP) les champs agricoles ; 0,050 pour les SP des sols nus et 0,410 (gazon) pour les SP des parcs, des terrains de soccer et des zones résidentielles. Ces valeurs sont extraites du manuel du logiciel SWMM 5.1. (Rossman et coll., 2015).

4.2 Modèles conceptuels LARA et LARA-PGO

Le modèle LARA représente le réseau de drainage urbain, proposé par l'étude CEREN-Lara, qui transporte les eaux pluviales tombées sur Lara. Le modèle LARA-PGO se base sur le modèle LARA en incluant la mise en place des PGO recommandées par cet essai, à savoir les barils de pluie (B), la végétation (V), et le stockage temporaire (ST) dans des terrains sportifs. La figure 13 (a, b et c) montre les différents modèles en fonction du type d'occupation du territoire.

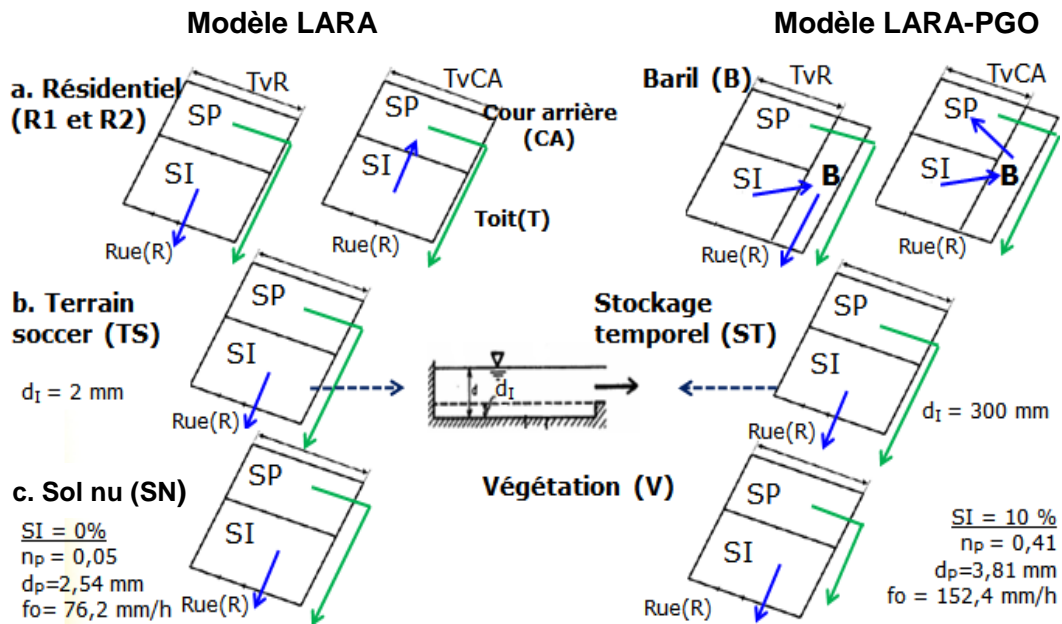


Figure 13. Modèles conceptuels LARA et LARA-PGO**A) Zones résidentielles (R1 et R2)**

Les zones résidentielles de Lara (R1 et R2) présentent deux scénarios de ruissellement pour le modèle LARA : un scénario TvR où la pluie qui ruisselle sur la surface imperméable — le toit de la maison, vers la rue (TvR) ; et un scénario TvCA où la pluie qui ruisselle du toit vers la surface perméable — ici la cour arrière. Dans ces deux cas, l'eau de pluie qui tombe sur la surface perméable est stockée jusqu'à 150 mm de hauteur avant de se déverser dans la rue (figure 14).

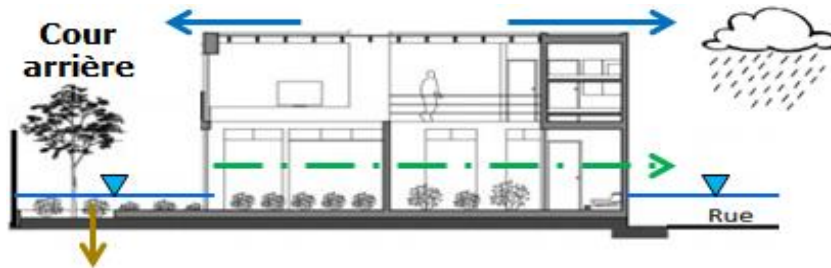


Figure 14. Scénarios de ruissellement de pluie des zones résidentielles

Le modèle LARA-PGO suit les mêmes scénarios que ceux du modèle LARA, à l'exception de l'ajout d'un baril de pluie par maison qui retient une partie de l'eau s'écoulant du toit. Le surplus est ensuite rejeté soit vers la rue soit vers la cour arrière. (figure 13-a).

B) Terrains de soccer (TS)

Les terrains de soccer du modèle LARA ont comme surface perméable le béton lisse. L'eau de pluie ruisselle de la surface imperméable vers la rue. Chaque TS a des murets périmétriques en béton de 300 mm de hauteur, mais ces derniers ne retiennent pas la pluie. Le modèle LARA-PGO prend en considération le stockage temporaire de la pluie qui tombe seulement sur la surface imperméable de TS jusqu'à hauteur de 300 mm, et ce grâce aux murets périmétriques clôturés.

C) Parcs à sol nu (SN)

Les SN du modèle LARA sont des parcs abandonnés sans couverture végétale. Les paramètres principaux sont : le pourcentage de surface imperméable ; le coefficient Manning des zones perméables (n_p) et imperméables (n_i) ; la pluie qui remplit les dépressions des surfaces perméables (d_p) et imperméables (d_i) ; ainsi que la capacité d'infiltration initiale du sol (f_0). Les SN du modèle LARA-PGO ont des surfaces perméables végétalisées entourées de trottoirs en béton qui constituent des surfaces imperméables.

Les paramètres des modèles LARA et LARA-PGO et leurs valeurs sont présentés à la figure 13-c.

D) D'autres sous-bassins

Pour le reste des sous-bassins tels que les parcs et les champs agricoles, les valeurs des paramètres restent les mêmes tant pour le modèle LARA que pour celui LARA-PGO.

4.3 Modélisation avec le logiciel SWMM 5.1

Le logiciel SWMM 5.1 permet de faire de la modélisation hydrologique et hydraulique des bassins et des réseaux de drainage en milieu urbain. Le logiciel comprend plusieurs modules : options de simulation, hydrologie, hydrauliques, et sorties.

A) Options de simulation (simulations options)

Le logiciel SWMM a des options qui contrôlent la façon de simuler le système de drainage des eaux pluviales. Le tableau 3 montre les options choisies pour l'essai.

Tableau 3. SWMM, options de simulation

Objet	Option	Commentaires
Modèle de processus	Précipitation/Ruissellement Routages d'écoulement	Accord avec les modèles LARA et LARA-PGO.
Modèle d'infiltration	Méthode de Horton	Méthode la plus fréquente en drainage urbain.
Modèle de routage	Onde cinématique	Méthode la plus complète pour représenter l'écoulement dans les conduits.

B) Hydrologie

Pluviomètres (rain gages)

Ce sont les pluviomètres qui fournissent les informations relatives aux précipitations pour tous les sous-bassins.

Tableau 4. SWMM, pluviomètres

Série	Durée/ fréquences de récurrence	Hyetogramme/ Intervalle du temps	Références
PVM-d1h-T2	1 heure/2 ans	Volume (mm)/5 min.	Figure 10
PVM-d1h-T5	1 heure/5 ans	Volume (mm)/5 min.	Figure 10
PVM-d1h-T50	1 heure/50 ans	Volume (mm)/5 min.	Figure 10
PVM-d24h-T2	24 heures/2 ans	Volume (mm)/1 heure.	Figure 11
PVM-d24h-T5	24 heures/5 ans	Volume (mm)/1 heure.	Figure 11
PVM-d24h-T50	24 heures/50 ans	Volume (mm)/1 heure.	Figure 11

PVM : Pluviomètre

d : durée de la pluie

T : fréquence de retour

Sous-bassins (subcatchments)

Les sous-bassins sont constitués de plusieurs îlots ou de parcelles qui ont des caractéristiques semblables (occupation de territoire). La pluie tombe sur ces sous-bassins et ruisselle vers les nœuds de drainage du réseau ou vers un autre sous-bassin voisin. La figure 15 montre la localisation des sous-bassins des modèles LARA et LARA-PGO, le tableau 5 et le tableau 6 indiquent les paramètres des deux modèles et leurs valeurs.

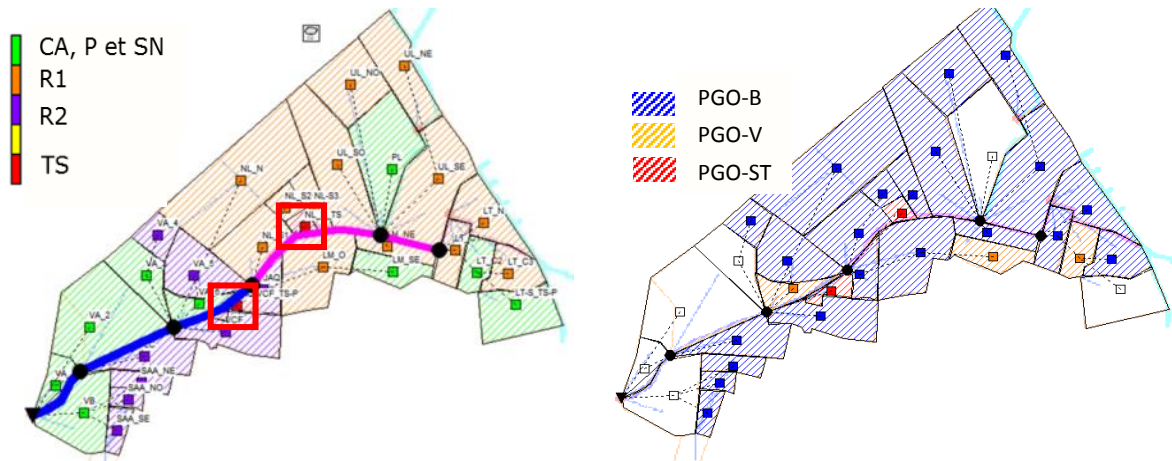


Figure 15. SWMM, sous-bassins des modèles LARA et LARA-PGO

Tableau 5. SWMM, paramètres des sous-bassins, modèle LARA

Paramètre	Unité	Occupation de territoire					
		R1	R2	CA	P	SN	TS
Aire (A)	Ha	0,77 - 6,18	0,44 - 2,22	0,74 - 5,07	2,2 - 3,4	0,9 - 1,2	0,5
Largeur (W)	m	32 - 225	47 - 225	25 - 262	110 - 130	72 - 146	40 - 93
Pente (S)	%	0,5	0,5	1,5 - 5,0	1,5	1,5	1,5
"n" imperméable		0,013	0,013	0,013	0,013	0,012	0,013
"n" perméable		0,410	0,410	0,170	0,410	0,410	0,410
di	mm	1,905	1,905	1,905	1,905	1,905	1,905
dp	mm	150	150	5,080	3,810	2,54	3,810
% imperméable	%	31	45	10	10	0	75
fo	mm/h	152,4	152,4	76,2	152,4	76,2	152,4
fc	mm/h	3,302	3,302	3,302	3,302	3,302	3,302
k	h-1	5	5	5	5	5	5

R1, R2 : Zones résidentielles
SN : Sol nu (parcs abandonnés)

CA : Champs agricoles
TS : Terrains de soccer

P : Parcs

Tableau 6. SWMM, paramètres des sous-bassins des modèles LARA/LARA-PGO

Paramètre	Unité	Modèle LARA		Modèle LARA-PGO	
		SN	TS	V	ST
Aire (A)	Ha	0,9 - 1,2	0,5	0,9 - 1,2	0,5
Largeur (W)	m	72 - 146	40 - 93	72 - 146	40 - 93
Pente (S)	%	1,5	1,5	1,5	1,5
"n" imperméable		0,012	0,012	0,012	0,012
"n" perméable		0,050	0,410	0,410	0,410
di	mm	2,54	1,905	1,905	300
dp	mm	2,54	3,810	3,810	3,810
% imperméable	%	0	75	10	75
fo	mm/h	76,2	152,4	152,4	152,4
fc	mm/h	3,302	3,302	3,302	3,302
k	h-1	5	5	5	5

La couleur rouge indique les paramètres où les valeurs changent pour chaque modèle.
V : PGO végétation ST : PGO stockage temporaire.

Baril (LID controls)

Les barils de pluie installés dans les zones résidentielles sont considérés par le logiciel SWMM comme des conteneurs qui capturent une partie des eaux pluviales du sous-bassin.

Tableau 7. SWMM, paramètres du baril

Objet	Option
Hauteur	940 mm
Aire	0,267 m ²
Drain	Non
Nb	1 baril/maison
État initial	Vide (0 %)
% SI traité	100

SI : surface imperméable

Hydraulique

Le réseau de drainage urbain de Lara est modélisé dans le logiciel SWMM par des nœuds et des conduits qui reçoivent et transportent les eaux pluviales des sous-bassins vers l'exutoire. Les paramètres et les valeurs de chaque composant du réseau sont montrés et schématisés aux tableau 8 et 9 ainsi qu'à la figure 16.

Tableau 8. SWMM, Nœud et exutoires du réseau urbain Lara

Type	Nom	Hauteur	Type	Nom	Hauteur
Nœud	AAraguez_UL3	2,8 m	Nœud	Cristales_E	2,50 m
Nœud	Calle3-UL1	2,41 m	Nœud	Cristales_O	2,50 m
Nœud	Sucre-AAraguez	2,50 m	Exutoire	Chilpinilla	(*)

Le niveau d'eau est déterminé par la valeur minimale entre la profondeur d'écoulement critique et la profondeur d'écoulement normal dans le conduit antérieur.

Tableau 9. SWMM, Conduits du réseau urbain Lara

ID	Type	Nœud		L (m)	h (m)	b (m)	n	S (%)
		Amont	Aval					
CE-PTO	R.F	AAraguez_UL3	Calle3-UL1	247.23	1.2	1.2	0.013	0.31
C3	R.F	Calle3-UL1	Sucre-Aarague	389.2	1.2	1.2	0.013	2.03
IAA1	R.F	Sucre-Aarague	Cristales_E	223.71	1.5	1.5	0.013	1.68
IAA2	R.F	Cristales_E	Cristales_O	262.76	1.5	1.5	0.013	0.70
IAA3	R.F	Cristales_O	Chilpinilla	174.28	1.5	1.5	0.013	0.46

R.F: Conduits rectangulaires fermés

n : Coefficient de Manning pour le béton

L,h, b : Longueur, hauteur et largeur du conduit

S : Pente du conduit.

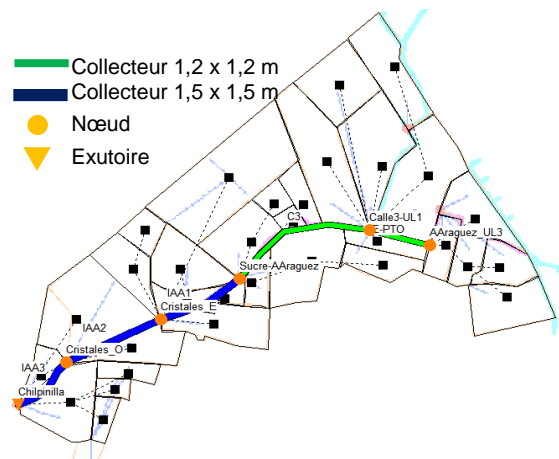


Figure 16. SWMM, Réseau pluvial de Lara

4.4 Scénarios critiques (SC) et indices de performance (IP)

Afin de pouvoir comparer efficacement les deux modèles, il est essentiel de définir les scénarios critiques (SC) du modèle LARA et les indices de performance du modèle LARA-PGO.

4.4.1 Scénarios critiques (SC)

Le modèle LARA a plusieurs scénarios qui dépendent non seulement des patrons de pluie (d= 1 et 24 heures), mais aussi du sens de ruissellement de la pluie (TvR et TvCA). Il faut donc définir des scénarios critiques (SC) c'est-à-dire ceux qui produisent les valeurs les plus élevées concernant le volume de ruissellement ainsi que le débit de pointe à l'exutoire, respectivement (V_{TOT} , 10^6 L) et (Q_{MAX} , L/s) ; de même que le volume d'infiltration des zones résidentielles (I_{R1+R2} , ha-m).

Le tableau 10 montre à titre indicatif la façon de déterminer le SC du paramètre V_{TOT} pour $T = 5$ ans. Dans cet exemple, le patron de pluie et le sens d'écoulement qui produisent la valeur la plus élevée de V_{TOT} (7×10^6 L) à l'exutoire est le SC TvCA-P1h.

Tableau 10. Exemple de la détermination des scénarios critiques (SC)

	T	Toit vers Rue (TvR)		Toit vers Cour arrière (TvCA)		Scénario critique (SC)	
	(ans)	P1H	P24H	P1H	P24H	Max valeur	Modèle
V_{TOT} (10^6 L)	T=2						
	T=5	5	6	7	4	7	TvCA-P1H
	T=50						
Q_{MAX} (L/s)	T=2						
	T=5						
	T=50						
I_{R1+R2} (Ha-m)	T=2						
	T=5						
	T=50						

P_{1h} : Patron de pluie d'une durée d'une heure
P_{24h} : Patron de pluie d'une durée de 24 heures

4.4.2 Indice de performance (IP)

Pour évaluer l'efficacité de la mise en place des PGO (B, V et ST) ; trois indices seront utilisés. Il s'agit du volume (IP_V), du débit (IP_D) et de l'infiltration (IP_I). Le tableau 11 montre l'utilisation de ces indices en fonction de la mise en place de chaque PGO à Lara.

Tableau 11. Indices de performance par PGO

	T	PGO			
	(ans)	B	V	ST	B+V+ST
IP_V (%)	T=2	✓	✓	✓	✓
	T=5	✓	✓	✓	✓
	T=50	✓	✓	✓	✓
IP_D (%)	T=2	✓	✓	✓	✓
	T=5	✓	✓	✓	✓
	T=50	✓	✓	✓	✓
IP_I (%)	T=2	✓			
	T=5	✓			
	T=50	✓			

A) IP_V

Le problème de Lara est la présence de zones inondables en milieu urbain dû aux volumes de ruissellement en surface. Le but de la mise en place des PGO est de réduire ces volumes. L' IP_V est le ratio, en pourcentage, entre le volume total ruisselé (V_{TOT} , 10^6 L) de LARA et celui de LARA-PGO pour le SC choisi. Le V_{TOT} est l'écoulement qui sort par l'exutoire du réseau de drainage. Ces valeurs sont obtenues par le logiciel SWMM dans *Summary result/Outfall loading/Total volume*. La figure 17 montre le calcul de l' IP_V des PGO dans le quartier de Lara.

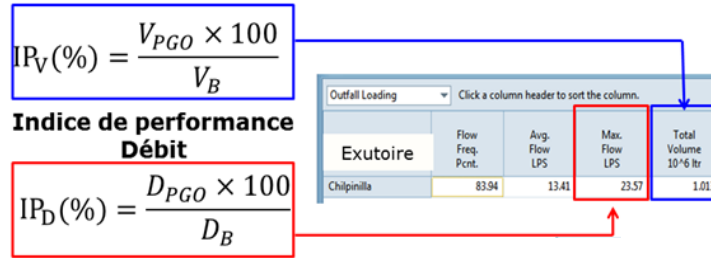


Figure 17. Indices de performance de volume (IP_v) et débit (IP_d)

B) IP_d

Les problèmes du canal *Chilpinilla*, qui est le milieu récepteur du collecteur pluvial existant, sont dus à la baisse de la capacité de conduction du canal des débits de pointe. La présence des PGO a pour objectif de réduire ces débits à la sortie du réseau de drainage — l'exutoire *Chilpinilla*. L' IP_d est le ratio, en pourcentage, entre le débit maximal instantané (Q_{MAX} , L/s) de LARA et celui de LARA-PGO pour le SC choisi. Le Q_{MAX} est le débit atteint à la sortie de l'exutoire du réseau de Lara. Ces valeurs seront obtenues par le logiciel SWMM dans *Summary résultat/Outfall loading/Max flow*. La figure 17 montre le calcul de l' IP_d des PGO.

C) IP_i

Contrairement aux objectifs des PGO en général et au Québec en particulier, cet essai a pour but la diminution de l'infiltration dans la zone résidentielle à cause du potentiel de liquéfaction du sol et le manque de drainage souterrain des maisons. La mise en place de barils de pluie vise à retenir une partie de l'eau de pluie qui ruisselle du toit vers la cour arrière. L' IP_i est le ratio, en pourcentage, entre la somme des volumes d'infiltration des sous-bassins résidentiels (I_{R1+R2} , ha-m) de LARA et ceux de LARA-PGO pour le SC choisi. Les valeurs ainsi obtenues sont le résultat de l'ensemble des hauteurs de pluie infiltrées, obtenues avec le logiciel SWMM dans *Summary résultat/Subcatchment runoffding/Total infil.*, multiplié par la surface de chaque sous-bassin. La figure 18 montre le calcul de IP_i des barils de pluie dans les zones résidentielles.

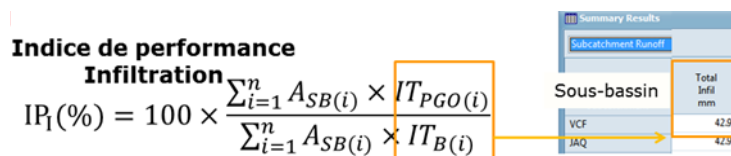


Figure 18. Indice de performance d'infiltration (IP_i)

5. RÉSULTATS

Le chapitre 5 présente la sélection des scénarios critiques (SC) et les résultats de la mise en application de ces derniers pour les modèles LARA et LARA-PGO en utilisant le logiciel SWMM comme interface numérique. Les résultats des SC du modèle LARA serviront de référence pour comparer les résultats obtenus avec le modèle LARA-PGO. Ces derniers sont regroupés par les indices de performance suivants : le volume, le débit et l'infiltration.

5.1 Modèle LARA — Scénarios critiques (SC)

Les SC du modèle LARA sont les scénarios qui produisent les valeurs les plus élevées pour chaque paramètre de mesure : volume, débit et infiltration.

Le tableau 12 indique que le scénario de pluie TvR-P24H génère les volumes de ruissellement les plus élevés (V_{TOT}), à l'exception de $T=2$ ans où le scénario de pluie TvR-P1H, plus intense (P_{1h}), ruisselle plus que la pluie P_{24h} , soit respectivement 15,25 mm contre 11,77 mm.

Par rapport au débit de pointe (Q_{MAX}), les résultats montrent que les pluies courtes (P_{1h}) donnent des valeurs plus élevées. Les débits ainsi obtenus pour des pluies P_{1h} sont de 7 à 16 fois plus importants que les valeurs obtenues pour les pluies P_{24h} quel que soit le sens de ruissellement, TvR ou TvCA.

Tableau 12. Scénarios critiques (SC) du modèle LARA

	T (ans)	Toit vers Rue (TvR)		Toit vers Cour arrière (TvCA)		Scénario critique (SC)	
		P1H	P24H	P1H	P24H	Valeur	Modèle
V_{TOT} (10^6 L)	T=2	1.780	1.240	0.286	0.206	1.780	TvR-P1H
	T=5	2.160	2.290	0.339	0.381	2.290	TvR-P24H
	T=50	3.250	6.580	0.516	1.010	6.580	TvR-P24H
Q_{MAX} (L/s)	T=2	554	34	91	6	554	TvR-P1H
	T=5	696	57	114	10	696	TvR-P1H
	T=50	1138	160	178	24	1138	TvR-P1H
I_{R1+R2} (Ha-m)	T=2	0.436	0.335	0.609	0.462	0.609	TvCA-P1H
	T=5	0.511	0.571	0.715	0.806	0.806	TvCA-P24H
	T=50	0.703	1.431	0.991	2.000	2.000	TvCA-P24H

Les valeurs du volume d'infiltration les plus élevées dépendent du sens du ruissellement (TvCA) et de la durée des pluies (P_{24h}), sauf pour le $T=2$ ans où la pluie courte (P_{1h}) produit un plus grand volume d'infiltration. Les SC de pluie à travailler avec le modèle LARA-PGO est présentée au tableau 12 (colonne SC).

5.2 Modèle LARA-PGO

La mise en place de barils de pluie (B), la végétation des parcs abandonnés (V), le stockage temporaire de la pluie dans les terrains de soccer (ST), toutes ces PGO ont des effets sur la réduction du volume de ruissellement, des débits de pointe et du volume d'infiltration. Ces effets sont mesurés par les indices de performance IP_V (volume), IP_D (débit) et IP_I (infiltration).

5.2.1 Indice de performance volume IP_V

L' IP_V montre l'efficacité de la mise en œuvre des PGO où les valeurs les moins élevées d' IP_V indiquent les meilleures PGO — celles qui obtiennent le volume le plus bas. Ces valeurs sont présentées au tableau 13. La comparaison des IP_V , elle, est exposée à la figure 19.

Tableau 13. Résultats du modèle LARA-PGO, volumes totaux de ruissellement

	T	Modèle LARA		Modèle LARA-PGO			
	(ans)	SC		V	ST	B	V+ST+B
V_{TOT} (10^6 L)	T=2	TvR-P1H	1.780	1.740	1.680	1.470	1.370
	T=5	TvCA-P24H	2.290	2.340	2.120	2.020	1.930
	T=50	TvCA-P24H	6.580	6.550	6.280	6.310	5.920

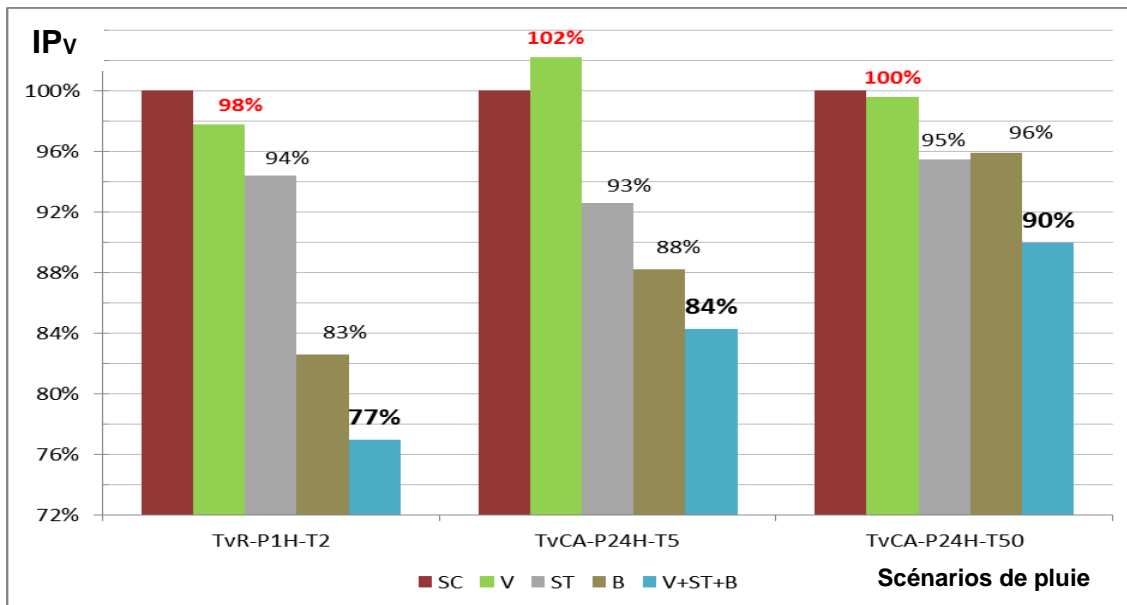


Figure 19. Résultats du modèle LARA-PGO, Indice de performance volume (IP_V)

La PGO la plus performante est la mise en place des trois PGO (V+ST+B) avec les valeurs d' IP_V de 77 % (T=2), 84 % (T=5) et 90 % (T=50).

La PGO isolée la plus efficace est la mise en place de B dans les zones résidentielles (R1 et R2) pour les scénarios de pluie TvR-P1H-T2 et TvCA-P24H-T5. Pour le scénario de pluie TvCA-P24H-T50 le ST est la PGO isolée la plus efficace.

La végétation des parcs abandonnés (V) n'a pas d'influence sur la diminution des hauteurs de pluie ruisselée (VR) à cause des hauteurs d'infiltration (Itot) et du stockage en surface (SS) des sous-bassins. En effet, ces derniers ont presque les mêmes valeurs tant pour les sols nus que pour les sols végétalisés (tableau 14). Le ruissellement des pluies sur des surfaces imperméables telles que les trottoirs en béton des sous-bassins végétalisés, neutralisent les effets des hauteurs de pluie qui est soit infiltrés soit stockés.

Tableau 14. Hauteurs de pluie des modèles LARA et LARA-PGO, IP_V

	T	Modèle LARA		Modèle LARA-PGO			
	(ans)	SC		V	ST	B	V+ST+B
P (mm)	T=2	TvR-P1H	15.25	15.25	15.25	15.25	15.25
	T=5	TvR-24H	20.01	20.01	20.01	20.01	20.01
	T=50	TvR-24H	50.05	50.05	50.05	50.05	50.05
VR (mm)	T=2	TvR-P1H	2.89	2.82	2.73	2.39	2.22
	T=5	TvR-24H	3.75	3.82	3.60	3.32	3.16
	T=50	TvR-24H	10.73	10.69	10.14	10.28	9.66
Itot (mm)	T=2	TvR-P1H	11.88	11.93	11.88	11.74	11.74
	T=5	TvR-24H	15.78	15.69	15.82	15.58	15.50
	T=50	TvR-24H	38.68	38.69	38.68	38.51	38.53
SS (mm)	T=2	TvR-P1H	0.51	0.52	0.68	1.14	1.31
	T=5	TvR-24H	0.53	0.54	0.75	1.16	1.39
	T=50	TvR-24H	0.73	0.76	1.32	1.35	1.96

P : Hauteur totale de pluie
Itot : Infiltration totale

VR : Volume ruisselé
SS : Stockage en surface

5.2.2 Indice de performance débit IP_D

L'IP_D montre l'efficacité de la mise en œuvre des PGO où les valeurs les moins élevées d'IP_D indiquent les PGO les plus efficaces c'est-à-dire où l'on observe une importante réduction du débit. Les valeurs des débits de pointe sont présentées au tableau 15. La comparaison des IP_D est exposée à la figure 20.

Tableau 15. Résultats du modèle LARA-PGO, débits de pointe

	T	Modèle LARA		Modèle LARA-PGO			
	(ans)	SC		B	V	ST	B+V+ST
Q _{MAX} (L/s)	T=2	TvR-P1H	554	536	556	524	516
	T=5	TvR-P1H	696	675	702	654	647
	T=50	TvR-P1H	1138	1103	1102	1072	1030

Le PGO le plus performant est la mise en place des trois PGO à la source (V+ST+B) avec des valeurs d'IP_D de 93 % (T=2), 93 % (T=5) et 91 % (T=50).

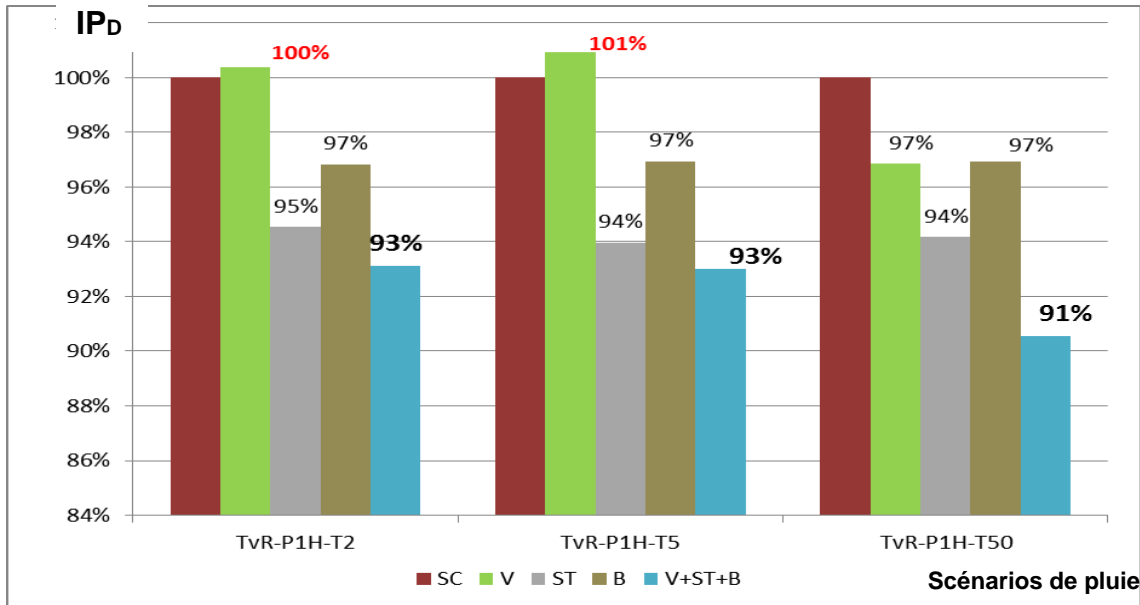


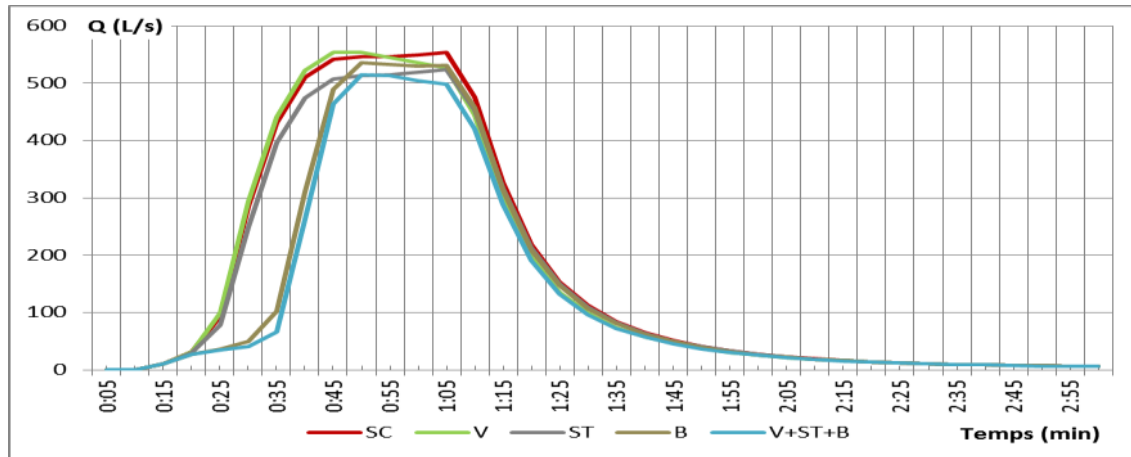
Figure 20. Résultats du modèle LARA-PGO, Indice de performance débit (IP_D)

La PGO isolée la plus performante est ST des eaux de pluie sur la partie imperméable des terrains de soccer. Ce résultat se répète pour les trois fréquences de retour (T= 2, 5 et 50 ans).

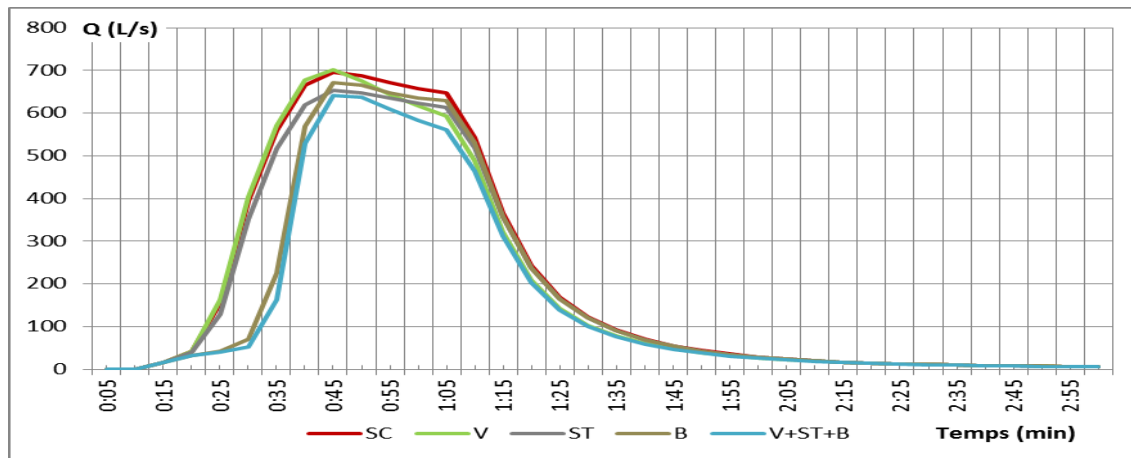
La mise en place des B dans les zones résidentielles (R1 et R2) retient un plus grand volume d'eau pluviale que les ST (tableau 16), avec des valeurs entre 40 et 67 % de plus par rapport à la ST. Par contre, l'influence des B sur les débits de pointe est moins importante que le ST. En effet, les barils ne font que retarder le débit de pointe par rapport au modèle LARA, mais ne le diminuent significativement en aucun cas (figure 21).

Tableau 16. Hauteurs de la pluie des modèles LARA et LARA-PGO, IP_D

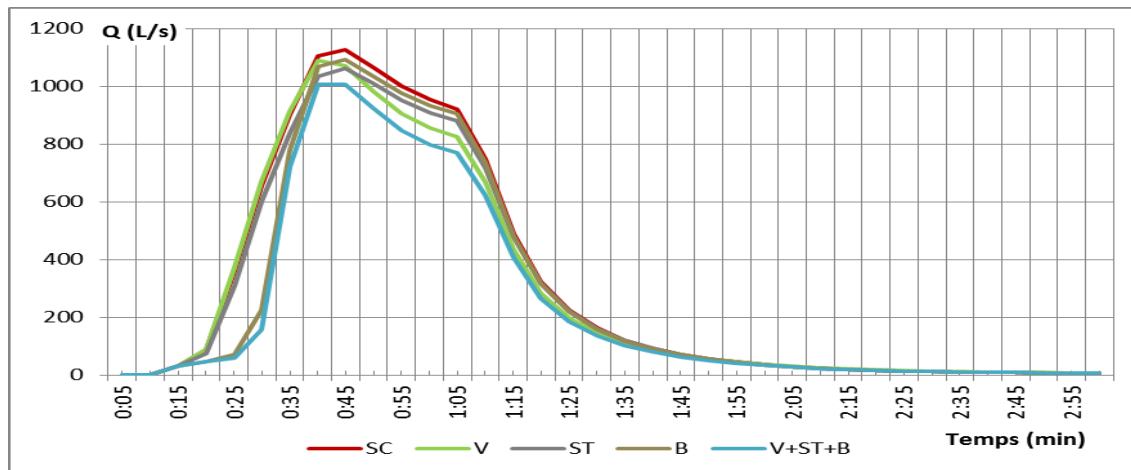
	T (ans)	Modèle LARA		Modèle LARA-PGO			
		SC	V	ST	B	V+ST+B	
P (mm)	T=2	TvR-P1H	15.25	15.25	15.25	15.25	15.25
	T=5	TvR-P1H	17.78	17.78	17.78	17.78	17.78
	T=50	TvR-P1H	24.18	24.18	24.18	24.18	24.18
VR (mm)	T=2	TvR-P1H	2.89	2.82	2.73	2.39	2.22
	T=5	TvR-P1H	3.51	3.36	3.32	3.01	2.73
	T=50	TvR-P1H	5.28	4.99	5.01	4.75	4.20
Itot (mm)	T=2	TvR-P1H	11.88	11.93	11.88	11.74	11.74
	T=5	TvR-P1H	13.79	13.93	13.79	13.66	13.74
	T=50	TvR-P1H	18.44	18.72	18.44	18.34	18.61
SS (mm)	T=2	TvR-P1H	0.51	0.52	0.68	1.14	1.31
	T=5	TvR-P1H	0.51	0.52	0.71	1.14	1.34
	T=50	TvR-P1H	0.51	0.52	0.78	1.14	1.42



a) Débits de pointe T= 2 ans



b) Débits de pointe T= 5 ans



c) Débits de pointe T= 50 ans

Figure 21. Débits de pointe à l'exutoire Chilpinilla des modèles LARA et LARA-PGO

5.2.3 Indice de performance infiltration IP_i

L' IP_i montre l'efficacité de la mise en œuvre des PGO — uniquement pour les barils de pluie ; où les valeurs les plus faibles d' IP_i indiquent les PGO les plus performantes c'est-à-dire celles dont le volume d'infiltration est faible. Les valeurs du volume d'infiltration des maisons de type R1 et R2 ainsi que l'ensemble de ces maisons sont présentées au tableau 17. Les valeurs d' IP_i sont exposées à la figure 22.

Tableau 17. Résultats des modèles LARA/LARA-PGO, Volume d'infiltration

	T	Modèle LARA		Modèle LARA-PGO
	(ans)	SC		B
I_{R1+R2} (Ha-m)	T=2	TvCA-P1H	0.609	0.571
	T=5	TvCA-P24H	0.806	0.769
	T=50	TvCA-P24H	2.000	1.981
I_{R1} (Ha-m)	T=2	TvCA-P1H	0.473	0.453
	T=5	TvCA-P24H	0.626	0.606
	T=50	TvCA-P24H	1.595	1.579
I_{R2} (Ha-m)	T=2	TvCA-P1H	0.136	0.118
	T=5	TvCA-P24H	0.181	0.163
	T=50	TvCA-P24H	0.404	0.402

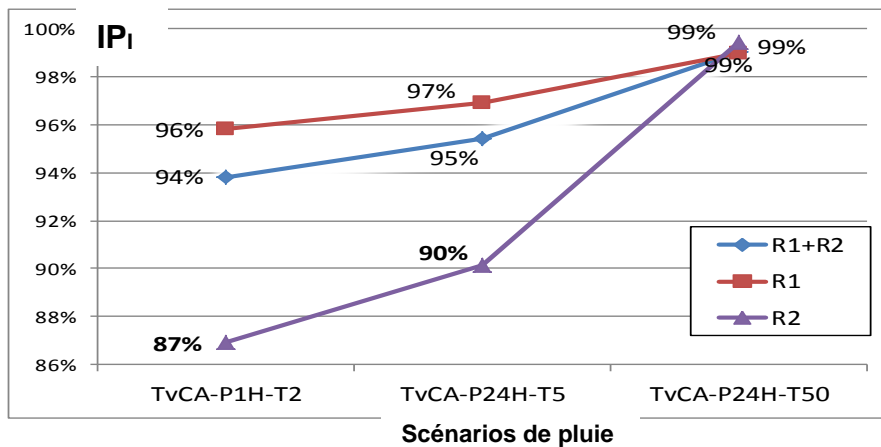


Figure 22. Résultats du modèle LARA-PGO, Indice de performance d'infiltration (IP_i)

Les barils de pluie sont plus efficaces avec des pluies de courte durée (P_{1h}) et récurrentes ($T=2$ ans). En revanche, si la pluie est longue (P_{24h}) et plus sporadique ($T=50$ ans), leur efficacité est presque nulle (99 %).

L'efficacité des barils de pluie est plus élevée pour les maisons de type R2 pour des pluies récurrentes ($T= 2$ et 5 ans). L'efficacité des barils diminue sensiblement pour les maisons de type R1 et ce quelque soit les scénarios de pluie.

CONCLUSION

Les objectifs de cet essai étaient d'évaluer le réseau de drainage pluvial du quartier Lara situé dans la ville d'Arequipa au Pérou, et ce grâce à la mise en place de pratiques de gestion optimale (PGO) à la source telles que des barils de pluie, de la végétation et un stockage temporaire. Les résultats de ces PGO ont été mesurés à l'aide de trois indices de performance (IP) : d'abord, la diminution du volume de ruissellement totale (IP_V) ; puis la diminution du débit de pointe (IP_D) à l'exutoire ; enfin, la diminution du volume d'infiltration (IP_I) dans les zones résidentielles. Les scénarios hydrologiques ont été réalisés en utilisant des patrons de pluies locales pour des pluies courtes (1 heure) et des patrons de pluies triangulaires pour des pluies longues (24 heures). Tous les scénarios de pluie ont été évalués pour des fréquences de retour de 2, 5 et 50 ans. La modélisation de l'infiltration des sols de Lara se fonde sur la méthode de Horton. Les valeurs des paramètres du sol présentées ont été tirées de la littérature et non des données de laboratoire, dû au manque d'information à ce sujet. Les modèles de drainage urbain qui ont été comparés dans cet essai sont le modèle LARA — le réseau existant, et le modèle LARA-PGO — le réseau avec les PGO. La simulation hydrologique et hydraulique des modèles LARA et LARA-PGO ont été réalisées avec le logiciel SWMM 5.1.

Les résultats de l'analyse des modèles LARA et LARA-PGO ont montré que :

- Les résultats de la définition des scénarios critiques (SC) du modèle LARA ont révélé que ce sont les pluies longues (24 h) qui produisent les volumes de ruissellement et d'infiltration les plus élevés, sauf pour les pluies récurrentes ($T=2$ ans) où les pluies courtes (1 h) produisent un plus grand volume de ruissellement et d'infiltration. Le sens du ruissellement sur les toits des maisons est un facteur important pour les SC des volumes de ruissellement et d'infiltration, étant donné que les volumes de ruissellement les plus élevés dépendent de la pluie qui ruisselle du toit vers la rue (TvR) et que les volumes d'infiltration dépendent du ruissellement du toit vers la cour arrière ($TvCA$). Par rapport aux débits de pointe, les SC sont ceux qui appartiennent aux pluies courtes (1 h) avec un sens de ruissellement TvR .
- L'ensemble des PGO c'est-à-dire des barils de pluie, du stockage temporaire et de la végétation, donnent les meilleurs résultats pour la réduction des volumes de ruissellement et des débits de pointe. L'efficacité de l'ensemble des PGO des volumes de ruissellement diminue avec l'augmentation de la fréquence des

réurrences. L'efficacité des PGO des débits de pointe est moins importante que celle des volumes de ruissellement, surtout en ce qui concerne les pluies récurrentes ($T=2$ ans).

- Les barils de pluie sont la PGO isolée la plus efficace concernant la réduction des volumes de ruissellement. L'effet le plus important touche les pluies récurrentes ($T=2$ ans). L'efficacité des barils sur les débits de pointe est faible — moins de 3%. L'efficacité des barils pour la réduction des volumes d'infiltration dans la cour arrière des maisons est plus élevée quand il s'agit de petites maisons (R2, lot de 134 m²) que de grandes et que les pluies sont récurrentes ($T=2$ ans).
- La végétation des parcs abandonnés n'a pas d'influence sur la diminution des volumes de ruissellement et des débits de pointe parce que les hauteurs d'infiltration et de stockage en surface sur ces terrains ne changent presque pas, tant pour les sols nus — modèle LARA, que pour les sols végétalisés — modèle LARA-PGO. Le ruissellement causé par la présence de surfaces imperméables - trottoirs en béton, et de terrains végétalisés neutralise les effets d'infiltration et de stockage de la végétation. La prise en compte d'une seule valeur de capacité d'infiltration ultime (f_c) ne représente pas efficacement le large éventail des valeurs de f_c des sols de Lara.
- La rétention temporaire des eaux pluviales qui tombent sur les surfaces imperméables, le béton, de terrains de soccer ont un faible impact sur la réduction des volumes de ruissellement et de débits de pointe de Lara. Leur efficacité est presque la même pour toutes les fréquences de récurrence. La capacité de stockage maximale, 300 mm, de cette PGO n'est jamais atteinte : il y a toujours de la place pour recueillir l'excédent de pluie.

Cet essai pose des limites concernant les résultats du modèle LARA, ces derniers doivent être validés par des mesures obtenues dans les réseaux de drainage existants - débitmètres et dans les sols du quartier - infiltromètres. À partir des données recueillies sur le terrain, il faudra réajuster le modèle LARA.

La capacité d'infiltration ultime (f_c) du sol est aussi une autre des limites de cet essai. En effet, l'obtention de valeurs réelles de f_c pour chaque type de sol donnera une meilleure interprétation des volumes d'infiltration des sols de Lara.

Le phénomène de l'infiltration dans cet essai est uniquement associé à des pluies ponctuelles (1 h ou 24 h) et non à un processus d'humidification et de saturation du sol.

De ce fait, les temps de modélisation de l'infiltration devront être plus longs — des semaines, voire des mois, afin de mieux comprendre les conditions antécédentes d'humidité et sécheresse.

Certaines modifications pourraient être apportées aux modèles afin de les améliorer et d'obtenir des résultats plus fiables. Ainsi, on pourrait proposer une mise en situation de scénarios plus réalistes comme la présence d'eau dans les barils avant le début de la pluie, de même que la mise en application des autres PGO à la source en fonction des conditions rencontrées en montagne. On peut penser par exemple au stockage de la pluie sur les toits des maisons avec des pots de fleurs, ou encore l'installation d' *Andenes* dans les champs agricoles et les parcs abandonnés.

RÉFÉRENCES

- Ancajima Ojeda, R. (2013, juillet 24). *Monolito de Saywite*. Consulté le mai 22, 2015, sur Hidráulica Inca: <http://hidraulicainca.com/apurimac/monolito-de-saywite/>
- Balmforth, D., Digman, C., Kellagher, R., & Butler, D. (2006). *C635. Designing for exceedance in urban drainage - good practice*. Construction industry research and information association (CIRIA), London.
- Camino, G. A. (2002). Rainfall Drainage: A case study of Cusco City. *Global Solutions for Urban Drainage*. Oregon.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. (McGraw-Hill, Éd.) Santa Fé de Bogotá, Colombie.
- Cuba Saucedo, F., & Ita Maguiña, N. (2008). *Guía climática turística*. Servicio Nacional de meteorología e hidrología del Perú (SENAMHI).
- Cumpa Alayza, D. S. (2002). *Criterio para el planeamiento de la ciudad de Piura*. Universidad de Piura, Piura.
- Cusco Portada. (2015, janvier 22). *Seda Cusco libera colectores de aguas pluviales y retira basura y botellas*. Consulté le mai 20, 2015, sur Cusco en portada: <http://www.cuscoenportada.com/seda-cusco-libera-colectores-de-aguas-pluviales-y-retira-innumerables-botellas>
- DEB. (s.d.). *Mapa de clasificacion climática. SENAMHI - Método de Werren Thornthwaite*. Consulté le mai 5, 2015, sur DEB consulting: <http://debconsulting.weebly.com/peruacute-clasif-climat-senamhi---wt.html>
- El Comercio. (2016, janvier 8). El aguacero que sorprendió a los limeños hace 46 años. *El Comercio*.
- Ettinger, S., Zeghdoudi, M., Manrique Llerena, N., Yao-Lafourcade, A.-F., & Thoure, J.-C. (2015). L'apport de l'imagerie pléiades à la cartographie des enjeux et de leur vulnérabilité face aux crues torrentielles : la ville d'Arequipa, Pérou. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*(209), 73-79.
- Andrews, A. (Producteur), & Foerster, B. (Réalisateur). (2012). *Astonishing Inca Stone Scale Model Of A City? Dr. Arlan Andrews Explains* [Film].
- García Calle, B. U. (2008). *Aplicación del análisis de confiabilidad en estructuras hidráulicas - dren Sullana*. Universidad de Piura, Piura.
- GE. (2015). Google Earth.
- GM. (2015). *Google Map*. Consulté le avril 15, 2015, sur <https://www.google.ca>

- Granda Acha, R. R. (2013). *Análisis numérico de la red de drenaje pluvial de la urb. Angamos*. Universidad de Piura, Piura.
- Her, S. K., Martine, R., Jørgense, P. M., & Tiesse, H. (2011). *Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes*. Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) et Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE).
- INDECI. (2002). *Instituto Nacional de Defensa Civil*. Consulté le mai 28, 2015, sur Programa Ciudades Sostenibles - Antecedentes: <http://www.indeci.gob.pe/contenido.php?item=MjY=>
- Lagacé, R. (2016). *Infiltration et Drainage*. Notes de cours, Université Laval, Québec.
- Málaga Gonzáles, F., Farfán Bazán, E., Víctor, R., & Núñez Monar, G. (2002). *Plan de mitigación sector Lara - Socabaya*. Universidad Nacional San Agustín, Arequipa.
- MDDELCC. (2010). *Guide de gestion des eaux pluviales*. Québec, Canada: Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.
- MVCS. (2006). *Drenaje pluvial urbano. Norma OS.060*. Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento del Perú (MVCS), Lima.
- MVCS. (2014). *Propuesta de norma O.S.060. Drenaje pluvial urbano*. Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento del Perú (MVCS), Lima.
- Oquendo Moreno, N. (2010, octobre 8). Investigación de las 7 maravillas del mundo. Machu Picchu. Colombie. Consulté le mai 22, 2015, sur <http://image.slidesharecdn.com/machupicchu-lider-101008162157-phppapp01/95/machu-picchu-lider-15-728.jpg?cb=1286555124>
- Rivard, G. (2005). *Gestion des eaux pluviales en milieu urbain*. Laval, Québec, Canada: Alias communication design inc.
- Rossmann, L. A. (2015). *Storm Water Management Model. User's Manual Version 5.1*. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati.
- Rossmann, L. A., & Huber, W. C. (2016). *Storm Water Management Model. Reference Manual. Volume I – Hydrology*. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati.
- Sullana. (2009). *Estudio mapa de peligros, plan de usos del suelo ante desastres y medidas de mitigación de la ciudad de Sullana*. Municipalidad de Sullana, Sullana.
- TYPSA. (2012). *Diagnóstico participativo consolidado cuenca Quilca-Chili. Tomo II*.
- UNIANDES. (2016). *Agua en América Latina: Abundancia en medio de la escasez mundial*. (U. d. Andes, Producteur) Consulté le Juin 2016, sur <https://www.edx.org/course/agua-en-america-latina-abundancia-en-idbx-idb3x-0>

UNSA. (2001a). *Inundaciones en la localidad de Arequipa ocasionadas por el ingreso de las torrenceras*. Universidad Nacional San Agustín.

UNSA. (2001b). *Mapa de peligros y lineamientos para el plan de usos de suelo de la ciudad de Arequipa*. Universidad Nacional San Agustín.

UNSA. (2002). *Plan de mitigación. Sector Lara - Socabaya*. Universidad Nacional San Agustín, Arequipa.

Viessman, W., & Lewis, G. (2003). *Introduction to hydrology*.

Wright, K. R., & Valencia Zegarra, A. (2000). *Machu Picchu. Civil engineering marvel*. E.U: ASCE.

ANNEXES

A. Tableaux

Tableau 18. Étude IILA, paramètres « k », et « ϵ_g » des zones pluviométriques du Pérou

ZONA	K'_g	Subzona	ϵ_g
123	$K'_g = 0,553$	123 ₁	$\epsilon_g = 85,0$
		123 ₂	$\epsilon_g = 75,0$
		123 ₃	$\epsilon_g = 100 - 0,022 Y$
		123 ₄	$\epsilon_g = 70 - 0,019 Y$
		123 ₅	$\epsilon_g = 24,0$
		123 ₆	$\epsilon_g = 30,5$
		123 ₇	$\epsilon_g = -2 + 0,006 Y$
		123 ₈	$\epsilon_g = 26,6$
		123 ₉	$\epsilon_g = 23,3$
		123 ₁₀	$\epsilon_g = 6 + 0,005 Y$
		123 ₁₁	$\epsilon_g = 1 + 0,005 Y$
		123 ₁₂	$\epsilon_g = 75,0$
		123 ₁₃	$\epsilon_g = 70$
4	$K'_g = 0,861$	4 ₁	$\epsilon_g = 20$
5a	$K'_g = 11 \cdot \epsilon_g^{-0,85}$	5 a ₁	$\epsilon_g = -7,6 + 0,006 Y$ (Y > 2300)
		5 a ₂	$\epsilon_g = 32 - 0,177 D_c$
		5 a ₃	$\epsilon_g = -13 + 0,010 Y$ (Y > 2300)
		5 a ₄	$\epsilon_g = 3,8 + 0,0053 Y$ (Y > 1500)
		5 a ₅	$\epsilon_g = -6 + 0,007 Y$ (Y > 2300)
		5 a ₆	$\epsilon_g = 1,4 + 0,0067$
		5 a ₇	$\epsilon_g = -2 + 0,007 Y$ (Y > 2000)
		5 a ₈	$\epsilon_g = 24 + 0,0025 Y$
		5 a ₉	$\epsilon_g = 9,4 + 0,0067 Y$
		5 a ₁₀	$\epsilon_g = 18,8 + 0,0028 Y$
		5 a ₁₁	$\epsilon_g = 32,4 + 0,004 Y$
		5 a ₁₂	$\epsilon_g = 19,0 + 0,005 Y$
		5 a ₁₃	$\epsilon_g = 23,0 + 0,0143 Y$
		5 a ₁₄	$\epsilon_g = 4,0 + 0,010 Y$

Source : MVCS, 2014.



Équations et paramètres pour la ville d'Arequipa

D_c Distance de la zone d'étude vers la partie occidentale des Andes = 3,5 km.

ϵ_g $\epsilon_g = 32 - 0,177 \times 3,5 = 31,3805$

K $K = K'_g, K = 11 \times 313805^{-0,85} = 0,0015$

Tableau 19. Étude ILLA, paramètres « n », et « a » des zones pluviométriques du Pérou

SUBZONA	ESTACION	N° TOTAL DE ESTACIONES	VALOR DE n	VALOR DE a
I23 ₁	321-385	2	0,357	32,2
I23 ₃	384-787-805	3	0,405	a = 37,85 – 0,0083 Y
I23 ₁₃	244-193	2	0,432	
I23 ₅	850-903	2	0,353	9,2
I23 ₆	840-913-918 958	4	0,380	11
I23 ₈	654-674-679 709-713-714 732-745-752	9	0,232	14,0
I23 ₉	769	1	0,242	12,1
I23 ₁₀	446-557-594 653-672-696 708-711-712 715-717-724 757-773	14	0,254	a = 3,01+ 0,0025 Y
I23 ₁₁	508-667-719 750-771	5	0,286	a = 0,46+ 0,0023 Y
5 a ₂	935-968	2	0,301	a = 14,1 – 0,078 D _c
5 a ₅	559	1	0,303	a = -2,6 + 0,0031 Y
5 a ₁₀	248	1	0,434	a = 5,80 + 0,0009 Y

Source : MVCS, 2014.

- Équations et paramètres pour la ville d'Arequipa
- n Paramètre de durée (adimensionnelle) = 0,303
 - D_c Distance de la zone d'étude vers la partie occidentale des Andes = 3,5 km
 - a Paramètre d'intensité de pluie = 14,1 – 0,078 x3, 5 = 13,827

Tableau 20. Valeurs des eaux canalisées (t_r).

SousTronçon (1)	Q (2) (m ³ /s)	B (3) (m)	h (3) (m)	S (3) (%)	n	V (m/s)	L (3) (m)	tt (min)
C1SA-1	1,50	1,00	0,40	1,8	0,013	3,78	375,00	1,66
C1SA-2	1,50	1,00	0,41	1,7	0,013	3,70	37,90	0,17
C1SA-3	1,50	1,00	0,43	1,5	0,013	3,53	147,81	0,70
C1PL-1	1,50	1,00	0,49	1,0	0,013	3,04	74,87	0,41
C1PL-2	1,50	1,00	0,46	1,2	0,013	3,25	50,52	0,26
C1LP-3	1,50	1,00	0,39	1,9	0,013	3,85	53,05	0,23
C1LP-4	1,50	1,00	0,44	1,4	0,013	3,44	37,26	0,18
C1PL-5	1,50	1,00	0,45	1,3	0,013	3,35	54,64	0,27
C1PL-6	1,50	1,00	0,43	1,4	0,013	3,47	118,53	0,57
C2-1	4,88	1,20	0,84	1,6	0,013	4,83	88,85	0,31
C2-2	4,88	1,20	0,91	1,3	0,013	4,46	99,90	0,37
C2-3	4,88	1,20	1,01	1,0	0,013	4,01	72,60	0,30
C2-4	4,88	1,20	0,73	2,3	0,013	5,57	128,50	0,38
C2-5	4,88	1,20	0,94	1,2	0,013	4,32	108,00	0,42
IAA-1	4,88	1,50	0,66	1,7	0,013	4,94	251,63	0,85
IAA-2	4,88	1,50	0,75	1,2	0,013	4,34	127,50	0,49
IAA-3	4,88	1,50	0,79	1,0	0,013	4,10	139,10	0,57
IAA-4	4,88	1,50	0,80	1,0	0,013	4,08	27,26	0,11
						S	1992,92	8,24

Q : Débit

B= Largeur du canal

h = Hauteur du canal

S= Pente

n= coefficient de Manning

V = Vitesse d'écoulement

L : Longueur du conduit

(1) Les sigles indiquent les conduits du réseau de DU de Lara

(2) Les valeurs sont extraites des plans D-3 et D-4 (UNSA, 2002)

(3) Les valeurs sont extraites du rapport hydrologique (UNSA, 2002)

Tableau 21. Patrons de pluie d=1h, méthode du bloque alterne

T= 2	1	2	3 = 1*2	4	5
d (mm)	t (mm)	I (mm/h)	S (mm)	D (mm)	(mm)
0-5	5	17,36	1,45	1,45	1,20
5-10	10	16,94	2,82	1,38	1,21
10-15	15	16,61	4,15	1,33	1,24
15-20	20	16,34	5,45	1,30	1,27
20-25	25	16,12	6,72	1,27	1,33
25-30	30	15,94	7,97	1,25	1,45
30-35	35	15,78	9,21	1,24	1,38
35-40	40	15,65	10,43	1,22	1,30
40-45	45	15,53	11,64	1,21	1,25
45-50	50	15,42	12,85	1,21	1,22
50-55	55	15,33	14,05	1,20	1,21
55-60	60	15,24	15,24	1,19	1,19
				S	15,24


T= 5	1	2	3 = 1*2	4	5
d (mm)	t (mm)	I (mm/h)	S (mm)	D P(mm)	P (mm)
0-5	5	22,71	1,89	1,89	1,32
5-10	10	21,72	3,62	1,73	1,35
10-15	15	20,95	5,24	1,62	1,40
15-20	20	20,34	6,78	1,54	1,48
20-25	25	19,83	8,26	1,48	1,62
25-30	30	19,40	9,70	1,44	1,89
30-35	35	19,04	11,10	1,40	1,73
35-40	40	18,72	12,48	1,38	1,54
40-45	45	18,44	13,83	1,35	1,44
45-50	50	18,20	15,17	1,33	1,38
50-55	55	17,98	16,48	1,32	1,33
55-60	60	17,79	17,79	1,30	1,30
				S	17,79

T= 50	1	2	3 = 1*2	4	5
d (mm)	t (mm)	I (mm/h)	S (mm)	D (mm)	(mm)
0-5	5	36,15	3,01	3,01	1,61
5-10	10	33,74	5,62	2,61	1,70
10-15	15	31,88	7,97	2,35	1,82
15-20	20	30,38	10,13	2,16	2,02
20-25	25	29,14	12,14	2,02	2,35
25-30	30	28,10	14,05	1,91	3,01
30-35	35	27,21	15,87	1,82	2,61
35-40	40	26,45	17,63	1,76	2,16
40-45	45	25,77	19,33	1,70	1,91
45-50	50	25,18	20,98	1,65	1,76
50-55	55	24,65	22,60	1,61	1,65
55-60	60	24,17	24,17	1,58	1,58
				S	24,17

B. Figures



Figure 23. Régions géomorphologiques du Pérou

 Ville d'Arequipa

Source :

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8d/Peru_regiones_naturales.png

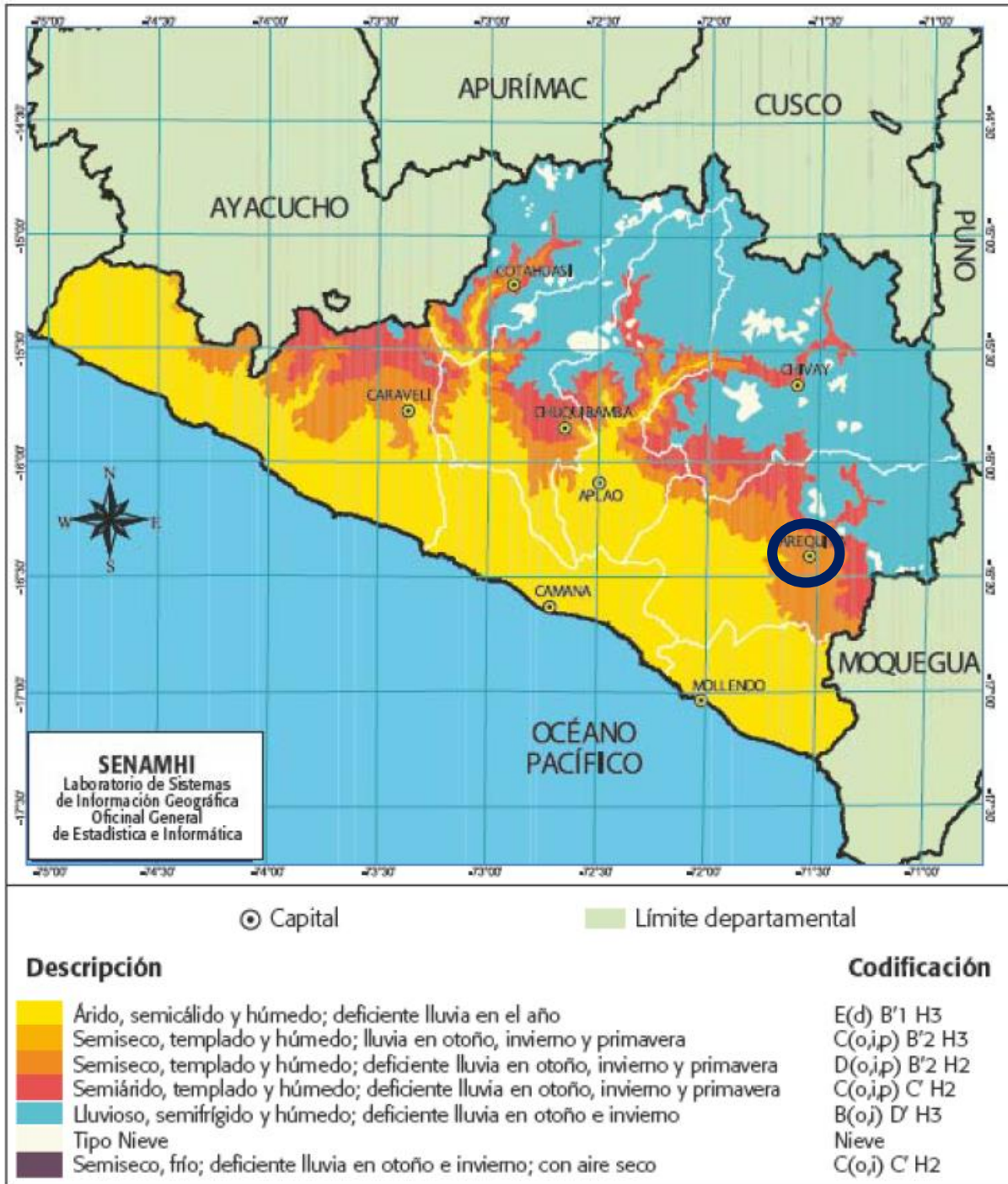


Figure 24. Climats de la région Arequipa (classification Thornthwaite)

○ Ville d'Arequipa

Source : Cuba, et coll. 2008.