

Scénarios d'atténuation des risques hydrauliques résiduels pour le cas d'étude en Sardaigne

Report n.2 - Produit T2.2.3. rédigé par:

Ilaria Gnecco

Anna Palla

Sommaire

Introduction	3
1 Le cas d'étude	4
1.1 Analyse du contexte	4
1.2 Informations territoriales	4
1.3 Perméabilité de la zone de pré-intervention COLANDER	9
1.4 Données pluviométriques	10
2 Implémentation du modèle simplifié pour les risques hydrauliques IDRORES	11
2.1 Schématisation des éléments	12
2.2 Paramètres hydrologiques-hydrauliques des éléments	12
3 L'état actuel des risques	13
4 Actions pour l'atténuation des risques hydrauliques	15
4.1 Pavés drainants	15
4.2 Jardins de pluie	18
4.3 Scénarios d'intervention	19
5 Résultats	19
5.1 Scénario avec systèmes secs	20
5.2 Scénario avec systèmes humides	23
6 Conclusions	24
Références bibliographiques	25

Introduction

Ce document constitue le Report n.2 du produit T.2.2.3. concernant l'activité T.2.2 "Modélisation du risque hydraulique résiduel pour le cas pilote principal et les études de cas simplifiées" et illustre les résultats de l'analyse du risque hydraulique résiduel pour le cas d'étude de Solarussa, sélectionnée sur le territoire de la Sardaigne.

Ce Report technique est organisé en 5 sections principales :

- La première section décrit en détail le contexte dans lequel se situe le cas pilote ; elle énumère les informations trouvées pour l'implémentation du cas dans la plateforme et rend compte de l'analyse effectuée en ce qui concerne la perméabilité de la zone et le régime des précipitations;
- La deuxième section présente le schéma de modélisation implémenté dans la plateforme TRIG-Eau ;
- La troisième section présente l'état actuel du risque hydraulique;
- Dans la quatrième section, l'intervention pour l'atténuation du risque hydraulique actuel est formalisée et conçue, c'est-à-dire la mise en œuvre du projet pilote COLANDER;
- La cinquième section décrit la condition de risque hydraulique résiduel c'est-à-dire la condition de risque post-installation des systèmes proposés.

1 Le cas d'étude

1.1 Analyse du contexte

Le bloc de Via Grazia Deledda dans la Municipalité de Solarussa, où le projet pilote COLANDER financé dans le cadre du projet TRIG Eau a été réalisé, a été sélectionné comme cas de étude pour l'application du modèle de risque hydraulique résiduel développé dans le cadre du projet T.R.I.G-Eau.

Le bloc de Via Grazia Deledda a un caractère essentiellement résidentiel avec une faible densité de population mais, avant le projet pilote, les zones perméables étaient limitées. Lors des inondations de 2013, le bloc a subi des inondations, principalement en raison de l'inadéquation du canal comblé qui le délimite.

L'intervention pilote COLANDER "Create Opportunity in LANDscape in Environment Risk" réalisé dans le cadre du projet T.R.I.G-Eau a consisté en la construction d'aires de repos dans des pavés drainants et des zones végétalisées conçues pour le stockage temporaire (jardins de pluie) des eaux de pluie afin de réduire le ruissellement superficiel de la pluie.

La figure 1 montre l'orthophoto de la zone d'étude avec un accent sur le bloc objet de l'intervention pilote COLANDER.



Figure 1: Orthophotos de la zone d'étude dans la municipalité de Solarussa (Sardaigne): le bloc de via Grazia Deledda et l'intervention pilote COLANDER. Source des données: Regione Sardegna

1.2 Informations territoriales

La caractérisation de la zone d'étude a été faite en trouvant toutes les informations disponibles.

En particulier en ce qui concerne les données spatiales, les informations suivantes ont été trouvées sous forme de cartes géoréférencées (.shp ou GEOTIFF):

- Périmètre de la zone d'étude;
- Orthophoto;
- Lithologie;
- Utilisation du sol;
- Modèle numérique de terrain et de surface.

Les extraits des cartes ci-dessus sont présentés dans les figures 2 à 5.



Figure 2: Extrait de l'orthophoto de la municipalité de Solarussa et du périmètre de la zone d'étude: bloc de via Grazia Deledda et l'intervention pilote COLANDER (périmètre en pointillés rouges). Source des données: Regione Sardegna.



Figure 3: Extrait de la carte de la lithologie de la municipalité de Solarussa et du périmètre de la zone d'étude: bloc de la via Grazia Deledda et intervention pilote COLANDER (périmètre en pointillés rouges). Source des données: PUC di Solarussa.



Figure 4: Extrait de la carte de l'occupation et de l'utilisation des sols de la municipalité de Solarussa et du périmètre de la zone d'étude: bloc de via Grazia Deledda et intervention pilote COLANDER (périmètre en pointillés rouges). Source des données: Provincia di Oristano



Figure 5: Extrait du modèle numérique de terrain (1mX1m) et périmètre de la zone d'étude : bloc de Via Grazia Deledda et intervention pilote COLANDER (périmètre en pointillés rouges). Source des données: Regione Toscana, dtm_006_2008_3003.

En ce qui concerne les informations planimétriques du réseau de drainage des eaux de pluie, le tableau de projet du réseau existant et du nouveau réseau fourni par la municipalité de Solarussa en format .dwg a été consulté (voir figure 6).

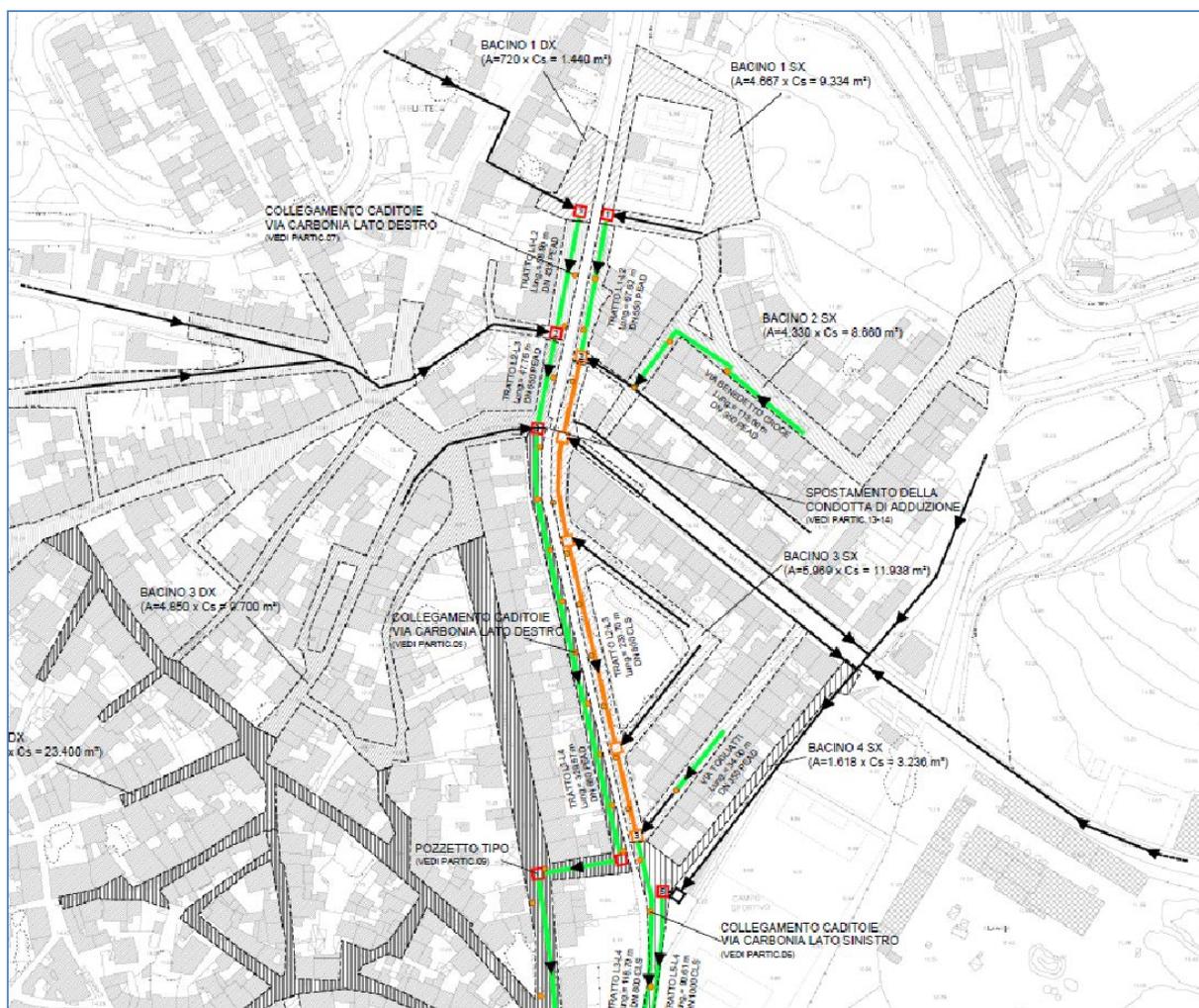


Figure 6: Extrait du tableau Identification des travaux du projet (réseau d'évacuation des eaux pluviales) comme mesures urgentes de sécurité et de réhabilitation des infrastructures pour les travaux publics endommagés par l'inondation des 18-19 novembre 2013. Source: Comune di Solarussa

Les autres informations spatiales détaillées suivantes relatives au projet pilote COLANDER ont été mises à disposition dans le cadre du projet T.R.I.G-Eau en format .dwg :

- Masterplan du projet;
- Plan architectural du projet;
- Détails sur l'architecture de l'exécutif;
- Installations du projet.

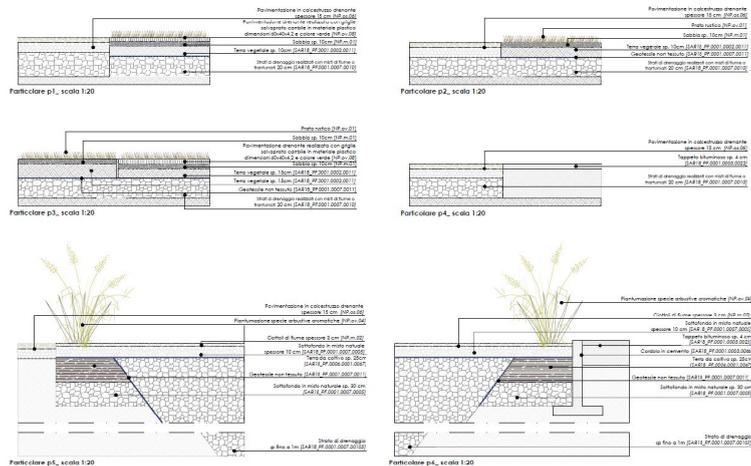


Figure 9: Extrait du tableau “Détails sur l’architecture de l’exécutif” de l’intervention pilote COLANDER.



Figure 10: Extrait du tableau “Installations du projet” de l’intervention pilote COLANDER.

1.3 Perméabilité de la zone de pré-intervention COLANDER

Pour l’analyse de la perméabilité de la zone de pré-intervention du COLANDER, il a été fait référence à la carte d’utilisation et de couverture du sol et au orthophoto.

La carte de l'occupation et de l'utilisation des sols ne montre qu'une seule catégorie de tissu résidentiel compact et dense pour la zone d'étude. La classification a été détaillée au moyen d'une analyse ortho-photographique et, en particulier, deux macro-classes ont été définies, les zones imperméables et les zones perméables auxquelles se réfèrent respectivement les catégories d'utilisation des sols suivantes:

- Pour les zones imperméables: toits, rues et parkings;
- Pour les zones perméables: jardins.

Le tableau 1 montre les résultats relatifs à la perméabilité de la zone étudiée, en particulier le bloc de via Grazia Deledda, pré-intervention du COLANDER, est confirmée comme une zone peu perméable avec un pourcentage de zones imperméables égal à 93% dont une partie importante est destinée aux routes et aux aires de stationnement (routes et parkings). Le pourcentage de surfaces destinées à la construction (43% de toits) ainsi que celles destinées à la voirie interne (50%) sont cohérentes avec le caractère résidentiel compact et dense.

Catégorie d'utilisation du sol	Surface [ha]	Surface [%]
Toits	0.1821	43.2%
Routes et parkings	0.2114	50.2%
Tot Surface Imperméable	0.3935	93.4%
Jardins	0.0277	6.6%
Tot Surface Perméable	0.0277	6.6
Tot	0.4212	100.0%

Tableau 1: Utilisation du sol de la zone d'étude et catégorisation en zones perméables et imperméables

1.4 Données pluviométriques

Le régime des pluies pour la zone étudiée a été évalué en se référant à l'étude régionale "Rapporto di sintesi sulla valutazione delle piene in Italia, sintesi del rapporto regionale Sardegna" (Rapport de synthèse sur l'évaluation des inondations en Italie, résumé du rapport régional de Sardaigne) en ce qui concerne la détermination des événements du projet.

En ce qui concerne les événements affectant le projet, il a été fait référence à l'estimation régionale des Lignes de Signalisation des Possibilités Pluviométriques (LSPP) évalué sur la zone d'étude, en particulier la régionalisation se réfère à deux lois de puissance monomique pour l'estimation de l'indice de pluie et du facteur de croissance:

$$\begin{aligned}\mu(d) &= a_1 \cdot d^{n_1} \\ K(d, T) &= a_2(T) \cdot d^{n_2(T)} \\ h(d, T) &= \mu(d) \cdot K(d, T) = a_1 \cdot a_2(T) \cdot d^{n_1 + n_2(T)}\end{aligned}$$

où $\mu(d)$ est la pluie indicatrice de la durée d , $K(d, T)$ est le coefficient de croissance pour la durée attribuée et pour la période de retour T et $h(d, T)$ est la hauteur maximale de la durée attribuée et de la période de retour. Les paramètres a_1 et n_1 peuvent être évalués en fonction

de l'indice journalier de pluie estimé au troisième niveau de régionalisation, tandis que les paramètres $a_2(T)$ et $n_2(T)$ peuvent être évalués en fonction de la sous-zone homogène.

La zone d'étude est située dans la sous-zone homogène 1 (SZO 1) et une pluie indicatrice quotidienne de 45 mm a été estimée pour laquelle des valeurs de 20,4 mm/hⁿ et 0,29 sont obtenues pour a_1 et n_1 respectivement.

Dans le Tableau suivant, pour les périodes de retour d'intérêt dans les évaluations des risques hydrauliques dans un contexte urbain, les valeurs des paramètres $a_2(T)$ et $n_2(T)$ évalués pour la zone d'étude sont indiquées.

Paramètres	Facteur de croissance			Période de return [ans]		
	2	5	10			
Coefficiente a_2	0.92	1.26	1.52			
Esponente n_2	-0.0043	-0.0097	-0.0138			

Tableau 2: Paramètres de la Lignes de Signalisation des Possibilités Pluviométriques pour la zone d'étude du bloc de via Grazia Deledda et de l'intervention pilote COLANDER, déduit de la régionalisation des pluies intenses pour la Sardaigne, SZO 1

Les événements du projet ont été définis en référence à l'hyétogramme de Chicago (Keifer et Chu, 1957), avec un temps de base de 30 minutes et un balayage temporel fin de 5 minutes, afin de simuler la composante critique pour la zone examinée, c'est-à-dire afin de simuler les flux maximums redoutables dans le réseau de drainage par période de retour assignée.

La figure 11 montre les hyétogrammes du projet pour la zone d'étude du bloc de via Grazia Deledda, objet de l'intervention COLANDER, évalués pour les périodes de retour de 2, 5 et 10 ans.

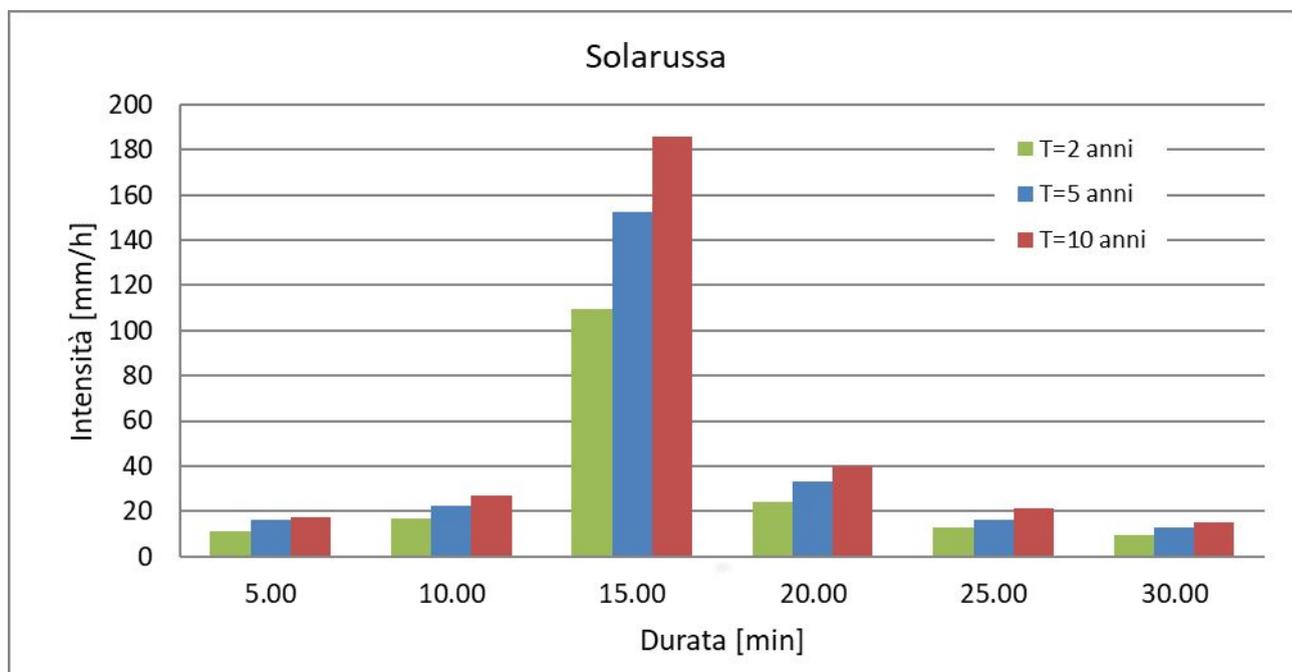


Figure 11: Hyétogramme du projet pour la zone d'étude de via Grazia Deledda, objet de l'intervention COLANDER, pour les périodes de retour de 2, 5 et 10 ans.

2 Implémentation du modèle simplifié pour les risques hydrauliques IDRORES

Le modèle simplifié de risque hydraulique résiduel permet de mesurer les effets d'un drainage urbain durable (autrement appelé infrastructures vertes) en termes de réduction du risque hydraulique.

Le modèle a été implémenté pour l'étude de cas sur la base d'informations spatiales faisant référence à une schématisation détaillée pour l'analyse du contexte (sous-bassins) et à une schématisation hypothétique pour le réseau de drainage.

2.1 Schématisation des éléments

Le bloc de via Grazia Deledda, objet de l'intervention COLANDER, a une extension totale de 0,42 ha, a été réintégré dans la plateforme de modélisation TRIG-Eau, en utilisant un schéma détaillé pour le réseau de drainage et les sous-bassins contribuables associés, en particulier le critère de discrétisation spatiale pour le réseau a suivi la conception finale en référence au réseau principal, tandis que pour les sous-bassins, il a suivi l'approche des catégories homogènes d'utilisation des sols.

En ce qui concerne le réseau de drainage, 9 nœuds et 7 conduites ont été définis comme indiqué dans la figure 12, conformément aux tableaux des projets. Dans la figure 12, la disposition du réseau de drainage des eaux de pluie est indiquée par un trait noir, où le diamètre de chaque conduites est indiqué par une étiquette bleue (diamètre exprimé en cm) tandis que la pente est indiquée par une étiquette noire.

En ce qui concerne les sous-bassins, 26 sous-bassins ont été inclus dans la plateforme TRIGEAU caractérisés par les catégories d'utilisation des sols suivantes:

- G-Jardins;
- P-Parkings
- S-Routes;
- T-Surface de toits.

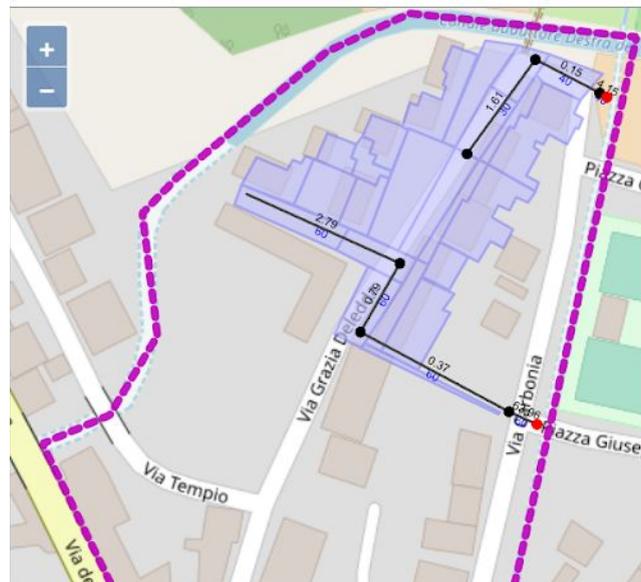


Figure 9: Implémentation dans la plateforme TRIG Eau de la zone d'étude de via Grazia Deledda, objet de l'intervention COLANDER. Indication des sous-bassins (polygones bleus) et du système de drainage des eaux de pluie (ligne noire), y compris les valeurs des diamètres en cm (étiquettes bleues) et des pentes (étiquettes noires) de chaque branche.

2.2 Paramètres hydrologiques-hydrauliques des éléments

Chaque section de filet est décrite par ses caractéristiques géométriques (diamètre, pente) et un paramètre hydraulique qui décrit sa résistance au mouvement, c'est-à-dire sa rugosité. Dans ce modèle, conformément aux matériaux spécifiés dans les documents de projet (PVC), il a été fait référence à un coefficient n- Manning pour les conduites de $0.013 \text{ s/m}^{1/3}$.

Chaque sous-bassin est également décrit par ses caractéristiques géométriques (surface, pente), ainsi que par des paramètres hydrauliques qui décrivent sa résistance au mouvement due au glissement de surface (rugosité) et des paramètres hydrologiques qui décrivent les fuites d'eau ou sa capacité à s'infiltrer dans les écoulements. En ce qui concerne la modélisation des pertes hydrologiques, il a été fait référence au modèle SCS - CN (SCS, 1972). En particulier, pour les 4 catégories d'utilisation des sols homogènes définies dans ce projet, les valeurs suivantes de paramètres hydrologiques et hydrauliques ont été attribuées comme indiqué dans le Tableau 3.

Sous-bassins	CN	% _{imp}	n _{imp}	n _{perv}
Jardins	50	35	0.011	0.13
Parkings	85	80	0.011	0.13
Routes	90	95	0.011	0.13
Toits	95	100	0.011	0.13

Tableau 3: Pourcentage de la surface imperméable, des paramètres hydrologiques (CN) et hydrauliques (n-manning pour la partie imperméable et perméable) de chaque catégorie de sous-bassin

3 L'état actuel des risques

Pour l'analyse de l'état actuel des risques, il est fait référence à l'implémentation d'une carte géoréférencée, pour une évaluation rapide, et à l'évaluation de deux indicateurs numériques de risque, pour une évaluation complète. La condition de risque est évaluée pour les trois événements affectant le projet, en fonction des valeurs de la période de retour de 2, 5 et 10 ans.

L'état actuel du risque hydraulique est évalué graphiquement en visualisant une carte montrant le niveau de remplissage maximal des éléments du système de drainage ainsi que le coefficient de ruissellement associé à chaque sous-bassin. Les sections du réseau qui présentent un degré de remplissage à considérer comme à risque, c'est-à-dire un degré de remplissage supérieur à 0,8, sont indiquées en rouge pour une visualisation rapide des points critiques.

Les indicateurs relatifs à l'état du réseau de drainage sont définis conformément à la proposition d'Ercolani et al. (2018) et sont calculés comme suit :

- NSI (Network Stress Index) calculé comme le nombre des branches ayant un taux de remplissage maximum supérieur ou égal à 0.8 par rapport au nombre total de branches;
- NFI (Nodes Flooding Index) calculé comme le nombre de nœuds inondés par rapport au nombre total de nœuds.

L'état de risque actuel du cas de étude s'avère nul car l'évaluation de l'insuffisance hydraulique, même pour l'événement le plus grave avec une période de retour de dix ans, ne montre aucune surcharge du réseau.

Les problèmes rencontrés dans la zone lors des inondations de 2013 ont en fait été causés par l'absence totale du réseau de drainage alors que, pour ces simulations, le réseau de drainage prévu a été mis en place et il est, également à la lumière de ces simulations, correctement dimensionné pour l'évacuation du flux du projet avec une période de retour de dix ans.

Des évaluations spécifiques au moyen de cartes du degré maximum de remplissage des branches et des analyses des indicateurs NSI - Network Stress Index et NFI - Node

Flooding Index, sont présentées dans les figures 13, 14 et 15 respectivement pour les événements ayant une période de retour de 2, 5 et 10 ans.

En particulier, il est à noter qu'en l'état actuel, le risque hydraulique est nul même pour l'événement le plus grave, comme on pouvait s'y attendre compte tenu du récent réseau de drainage correctement conçu pour éliminer le débit du projet avec une période de retour décennale.



Figure 13: Carte de l'état actuel du risque hydraulique pour le cas d'étude de Via Grazia Deledda objet de l'intervention COLANDER et indicateurs de la fonctionnalité du réseau de drainage (NSI - Network Stress Index ; NFI - Node Flooding Index) pour l'événement du projet avec une période de retour de 2 ans. En haut à droite se trouve la légende des éléments (niveau de remplissage des conduites et coefficient d'écoulement des sous-bassins) indiqués sur la carte.



Figure 14: Carte de l'état actuel du risque hydraulique pour le cas d'étude de Via Grazia Deledda objet de l'intervention COLANDER et indicateurs de la fonctionnalité du réseau de drainage (NSI - Network Stress Index ; NFI - Node Flooding Index) pour l'événement du projet avec une période de retour de 5 ans. En haut à droite se trouve la légende des éléments (niveau de remplissage des conduites et coefficient d'écoulement des sous-bassins) indiqués sur la carte.

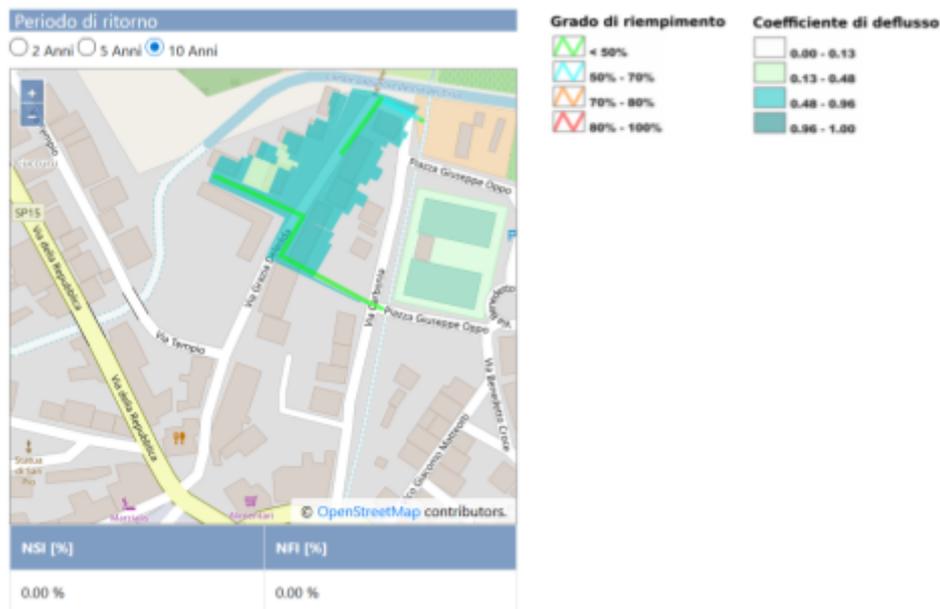


Figure 15: Carte de l'état actuel du risque hydraulique pour le cas d'étude de Via Grazia Deledda objet de l'intervention COLANDER et indicateurs de la fonctionnalité du réseau de drainage (NSI - Network Stress Index ; NFI - Node Flooding Index) pour l'événement du projet avec une période de retour de 10 ans. En haut à droite se trouve la légende des éléments (niveau de remplissage des conduites et coefficient d'écoulement des sous-bassins) indiqués sur la carte.

4 Actions pour l'atténuation des risques hydrauliques

L'action envisagée pour l'atténuation des risques hydrauliques dans le cas de étude est la mise en œuvre du intervention pilote COLANDER financé et réalisé dans le cadre du Projet

T.R.I.G-Eau. L'intervention pilote COLANDER prévoyait la construction de trottoirs drainants pour les aires de repos et de jardins pluviaux pour le stockage temporaire des eaux de pluie, dans le double objectif d'améliorer l'efficacité du drainage et d'accroître le potentiel écologique urbain.

4.1 Pavés drainants

L'intervention pilote COLANDER a vu la création de pavés drainants continu différenciés en termes de stratigraphie et de revêtement selon l'utilisation de la zone, comme illustré dans la figure 16.

En particulier, dans le portail TRIG Eau, trois types différents de revêtements de sol perméables, PP1, PP2 et PP3, ont été restitués, respectivement, en référence à l'aire de repos carrossable, principalement zone piétonne et zone d'entretien du canal. La mise en œuvre de ces systèmes dans le modèle de risque résiduel se fait à l'aide du module LID - Permeable Pavement implémenté en natif dans le logiciel EPA SWMM (Rossmann, 2010); les paramètres géométriques et hydrauliques ont été différenciés pour les trois types en fonction des informations techniques mises à disposition dans les plans du projet.

Les aires de repos carrossable sont réalisées avec des grilles de pavage en matière plastique selon le schéma d'installation indiqué à la figure 17. Dans la plate-forme, les paramètres de modélisation relatifs au schéma PP1, qui se réfère à l'aire de stationnement carrossable, ont été attribués conformément aux données de la stratigraphie et de la littérature (voir tableau 4).

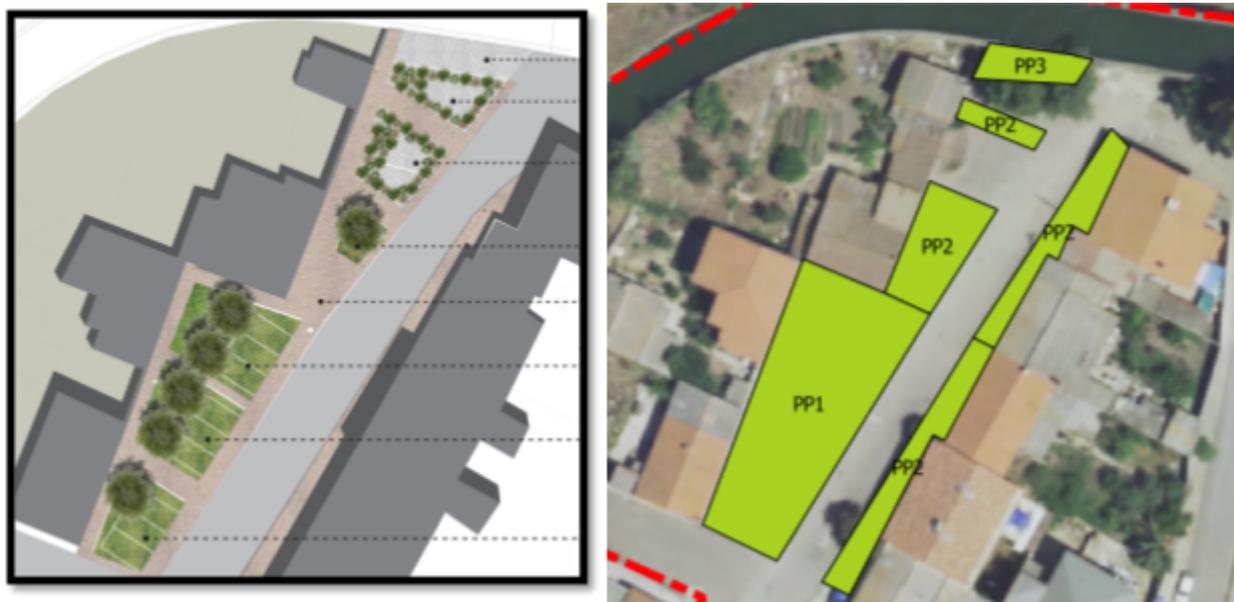


Figure 16 Retour dans la plateforme TRIG Eau du système de revêtements de sol perméables réalisé dans le bloc de via Grazia Deledda prévu par l'intervention pilote COLANDER.

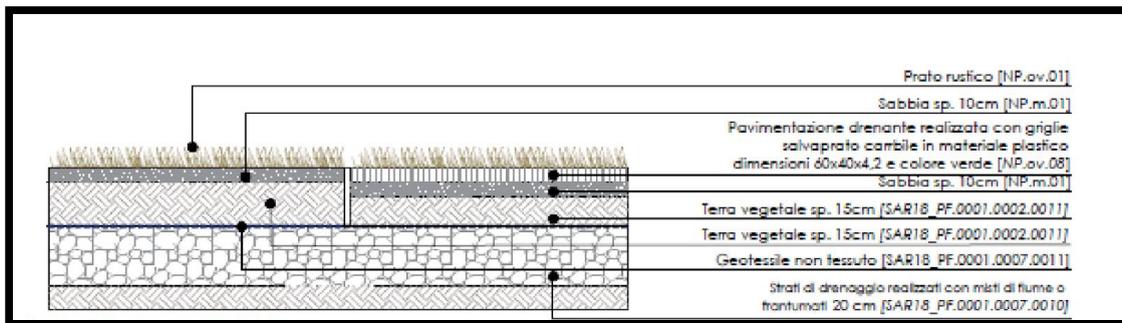


Figure 17 Stratigraphie de l'aire de stationnement en pavé drainante avec grilles de pavage, mise en œuvre dans le portail TRIG Eau avec le schéma appelé PPI

Pavé PPI	épaisseur [mm]	Index vide [-]	Perméabilité [mm/h]
Pavé	42	0.35	9000
Couche d'accumulation drainante	400	0.6	1000

Tableau 4: Paramètres assignés pour la modélisation des aires de repos en pavé drainant avec grilles de pavage - implémentées dans le portail TRIG Eau selon le schéma PPI.

Les zones de transit à prédominance piétonne sont réalisées avec une couche de finition avec un pavage drainant en béton selon le schéma de pose indiqué à la figure 18. Dans la plate-forme, les paramètres de modélisation pertinents pour le schéma PP2 concernant le transit des piétons ont été attribués de manière cohérente avec les données de la stratigraphie et de la littérature (voir tableau 5).

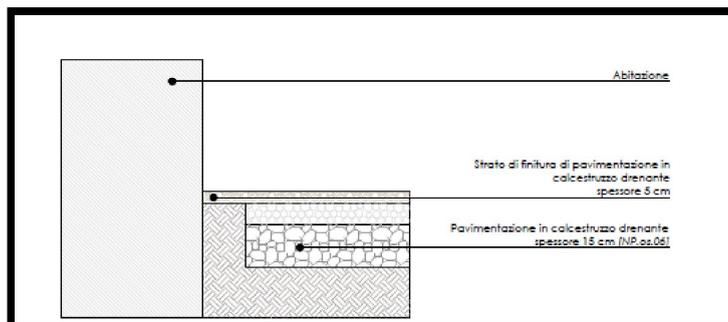


Figure 18 Stratigraphie des zones de transit à prédominance piétonne mise en œuvre dans le portail TRIG Eau avec le schéma appelé PP2

Pavage PP2	épaisseur [mm]	Index vide [-]	Perméabilité [mm/h]
Pavage	50	0.18	9000
Couche d'accumulation drainante	200	0.6	1000

Tableau 5: Paramètres assignés pour la modélisation des zones de transit à prédominance piétonne mise en œuvre dans le portail TRIG Eau selon le schéma PP1.

La zone sèche servant à l'entretien du canal est réalisée avec une couche de finition en galets de rivière selon le schéma de pose indiqué à la figure 19. Dans la plate-forme, les paramètres de modélisation pertinents pour le schéma PP3 concernant la zone sèche servant à l'entretien du canal ont été attribués conformément aux données de la stratigraphie et de la littérature (voir Tableau 6).

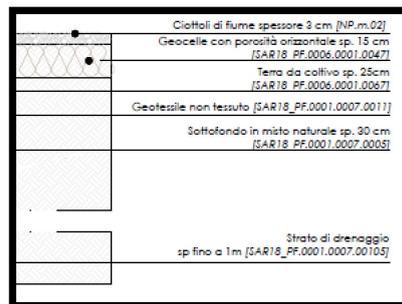


Figure 19 Stratigraphie de la zone sèche servant à l'entretien du canal mise en œuvre dans le portail TRIG Eau avec le schéma appelé PP3.

Pavage PP3	épaisseur [mm]	Index vide[-]	Perméabilité [mm/h]
Pavage	30	0.6	1000
Couche d'accumulation drainante	150	0.9	1000

Tableau 6: Paramètres assignés pour la modélisation de la zone sèche servant à l'entretien du canal implémenté dans le portail TRIG Eau selon le schéma PP3.

4.2 Jardins de pluie

L'intervention pilote COLANDER COLANDER a vu la création de deux zones d'infiltration contrôlée appelées jardins de pluie qui ont été systématiquement mises en œuvre dans le portail TRIG Eau, comme le montre la Figure 20.

L'implémentation des jardins de pluie dans le modèle de risque résiduel se fait à l'aide du module LID - Bioretention Cell nativement implémenté dans le logiciel EPA SWMM (Rossmann, 2010).

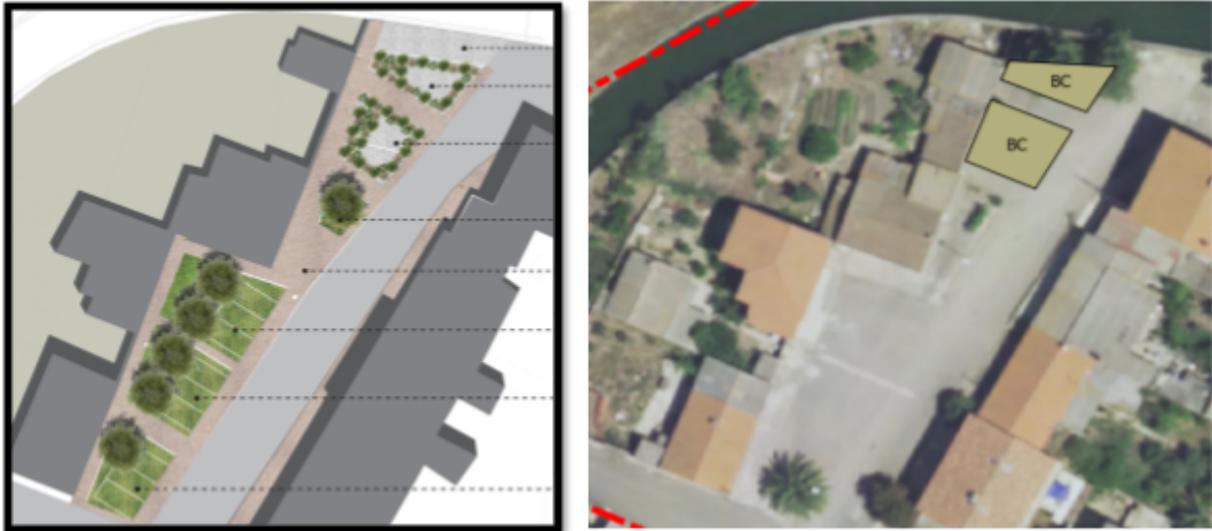


Figure 20 Retour à la plateforme TRIG Eau du système de jardins de pluie réalisé dans le bloc de via Grazia Deledda prévu par l'intervention pilote COLANDER.

Le jardin de pluie est réalisé avec une couche de finition en galets de rivière et la plantation d'espèces d'arbustes aromatiques selon le schéma de pose présenté dans la Figure 19. Dans la plateforme, les paramètres de modélisation pertinents pour le schéma BC concernant les jardins de pluie ont été attribués de manière cohérente avec les données de la stratigraphie et de la littérature (voir Tableau 7).

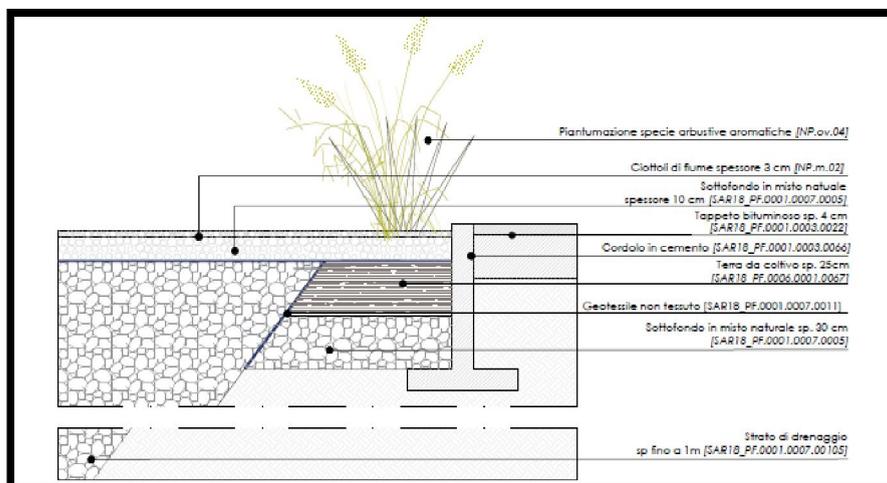


Figure 21 Stratigraphie des jardins de pluie implémentés dans le portail TRIG Eau avec le schéma appelé BC

Réservoir de drainage BC	épaisseur [mm]	Index vide [-]	Perméabilité [mm/h]
Surface	30	-	-
Sol	100	0.52	150
Couche d'accumulation drainante	1000	0.4	1000

Tableau 7: Paramètres assignés pour la modélisation des jardins de pluie implémentés dans le portail TRIG Eau selon le schéma BC.

4.3 Scénarios d'intervention

La superficie totale d'intervention est de 0,42 ha, c'est-à-dire que 7 % de la superficie a été convertie en systèmes de drainage durables.

Comme scénarios d'intervention, deux conditions limites pour le fonctionnement des systèmes de drainage urbain durables mis en œuvre avec l'intervention pilote COLANDER, systèmes secs et systèmes humides, ont été évaluées. L'analyse des résultats des deux scénarios limites était nécessaire pour établir le niveau d'incertitude dans l'estimation de l'efficacité associée à l'intervention pilote.

Bien que l'état actuel ne présente aucune criticité hydraulique, puisque le réseau de drainage est correctement conçu pour éliminer l'événement du projet dans la période de retour décennal, l'intervention pilote COLANDER est une action visant à réduire l'impact environnemental global sur le récepteur final en termes de restauration du cycle hydrologique naturel.

5 Résultats

Pour l'analyse de la condition de risque hydraulique résiduelle, c'est-à-dire la condition de risque post-intervention, on se réfère à l'analyse de la carte géoréférencée, illustrant le degré de remplissage maximal de chaque branche du réseau de drainage par analogie à l'évaluation de la condition de risque actuelle. Parallèlement à l'évaluation des indicateurs de risque numériques, NSI et NFI, d'autres indicateurs de performance sont évalués pour mesurer l'efficacité de l'intervention proposée. En particulier, en ce qui concerne l'atténuation des risques hydrauliques, outre les indicateurs de performance hydrologique habituels (Palla et al., 2017), deux indicateurs fondés sur les indicateurs de risque susmentionnés sont également évalués.

Les performances hydrologiques de l'intervention sélectionnée sont évaluées à l'aide des indicateurs suivants:

- PR: Pourcentage relatif de réduction du débit total évalué avant et après l'intervention;
- VR: pourcentage relatif de réduction du volume global de l'écoulement de surface à la section de fermeture évaluée avant et après l'opération.

Les performances de l'état du risque hydraulique résiduel du système, liés à l'intervention sélectionnée, est évaluée au moyen des indicateurs suivants:

- NSR (Network Stress Reduction) calculé comme le pourcentage relatif de réduction entre la condition avant l'intervention et après l'intervention;
- NFR (Nodes Flooding Reduction) calculée comme un pourcentage relatif de réduction entre la condition avant l'intervention et après l'intervention.

La condition de risque résiduel est évaluée pour les trois événements affectant le projet liés aux valeurs de la période de retour de 2, 5 et 10 ans et pour les deux scénarios d'intervention "Systèmes secs" et "Systèmes humides".

5.1 Scénario avec Systèmes secs

Bien qu'il n'y ait pas de risque hydraulique dans l'état actuel, l'intervention proposée dans le scénario "systèmes secs" est efficace pour réduire l'impact environnemental sur le récepteur final. En particulier, l'intervention proposée s'avère efficace pour réduire de manière significative à la fois les débit à son sommet et les volumes déversés dans le récepteur, améliorant ainsi les conditions d'écoulement du réseau en aval.

Les indicateurs relatifs aux conditions d'écoulement sont toujours nuls même dans la condition post-intervention pour tous les événements: les événements du projet caractérisés par des périodes de retour de 2, 5 et 10 ans, comme prévu étant donné l'absence de condition de risque de l'état actuel (voir Figure 22, Figure 24 et Figure 26). Il en résulte que pour tous les événements du projet dans le scénario "systèmes secs", les performances de l'état du réseau (NSR et NFR) sont toujours de 100% (voir Figure 23, Figure 25 et Figure 27).

L'intervention proposée est également efficace dans la restauration partielle du cycle hydrologique naturel, comme le confirment les performances hydrologiques remarquables d'environ 15% pour le volume, VR, et pour le débit de pointe, PR pour la section 1 et égales à environ 29% et 25% respectivement pour VR et PR de la section 2 (Figure 27).

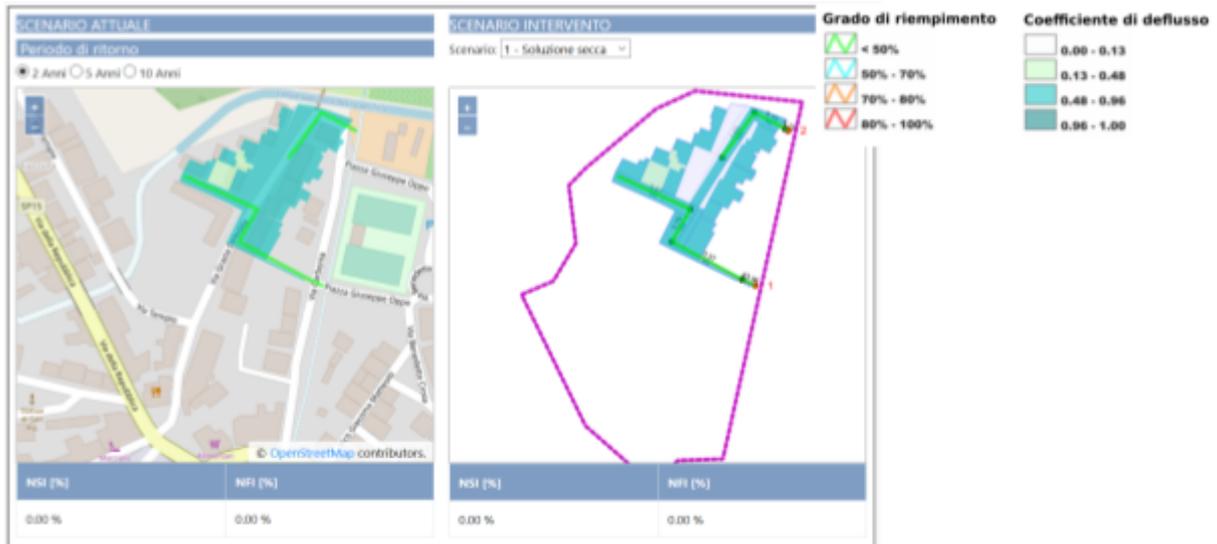


Figure 22: Carte de l'état actuel du risque hydraulique (à gauche) et du risque résiduel dans le scénario "systèmes secs" (à droite) pour le cas d'étude de Via Grazia Deledda objet de l'intervention COLANDER et indicateurs de la fonctionnalité du réseau de drainage (NSI - Network Stress Index ; NFI - Node Flooding Index) pour l'événement affectant le projet avec une période de retour de 2 ans. En haut à droite se trouve la légende des éléments (niveau de remplissage des conduites et coefficient de ruissellement des sous-bassins) indiqués dans la carte.

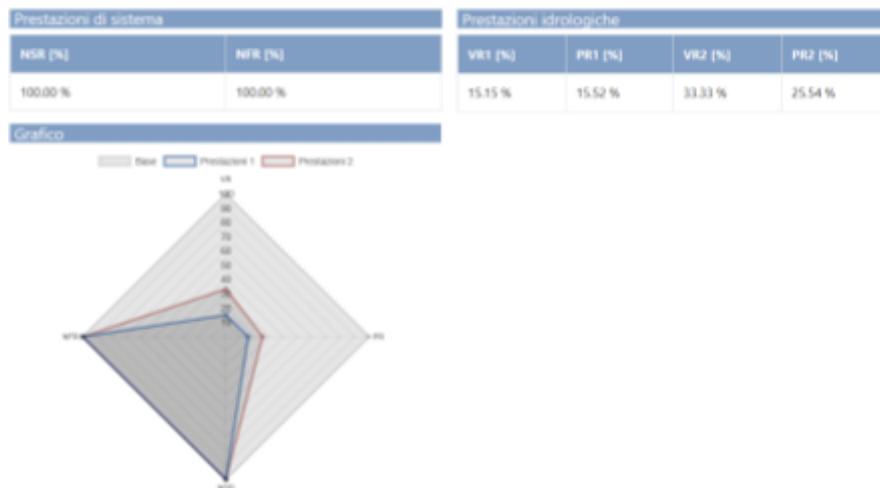


Figure 23: Performance du système (NSR - Network Stress Reduction et NFR - Node Flood Reduction), performance hydrologique (VR - Volume Reduction et PR - Peak Flow Reduction) et graphique radar correspondant dans le scénario "systèmes secs" pour le cas d'étude de Via Grazia Deledda objet de l'intervention COLANDER et pour l'événement du projet avec une période de retour de 2 ans.

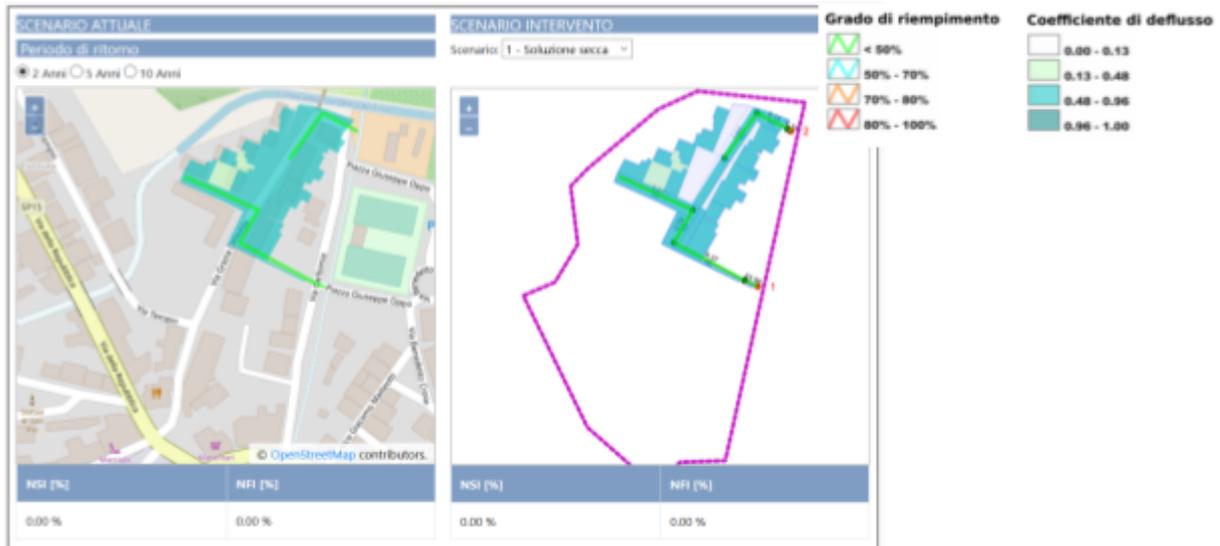


Figure 24: Carte de l'état actuel du risque hydraulique (à gauche) et du risque résiduel dans le scénario "systèmes secs" (à droite) pour le cas d'étude de Via Grazia Deledda objet de l'intervention COLANDER et indicateurs de la fonctionnalité du réseau de drainage (NSI - Network Stress Index ; NFI - Node Flooding Index) pour l'événement affectant le projet avec une période de retour de 5 ans. En haut à droite se trouve la légende des éléments (niveau de remplissage des conduites et coefficient de ruissellement des sous-bassins) indiqués dans la carte.

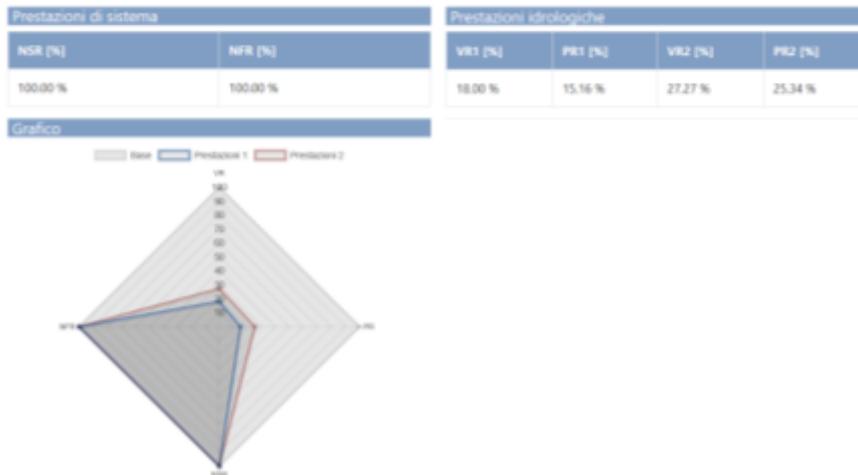


Figure 25: Performance du système (NSR - Network Stress Reduction et NFR - Node Flood Reduction), performance hydrologique (VR - Volume Reduction et PR - Peak Flow Reduction) et graphique radar correspondant dans le scénario "systèmes secs" pour le cas d'étude de Via Grazia Deledda objet de l'intervention COLANDER et pour l'événement du projet avec une période de retour de 5 ans.

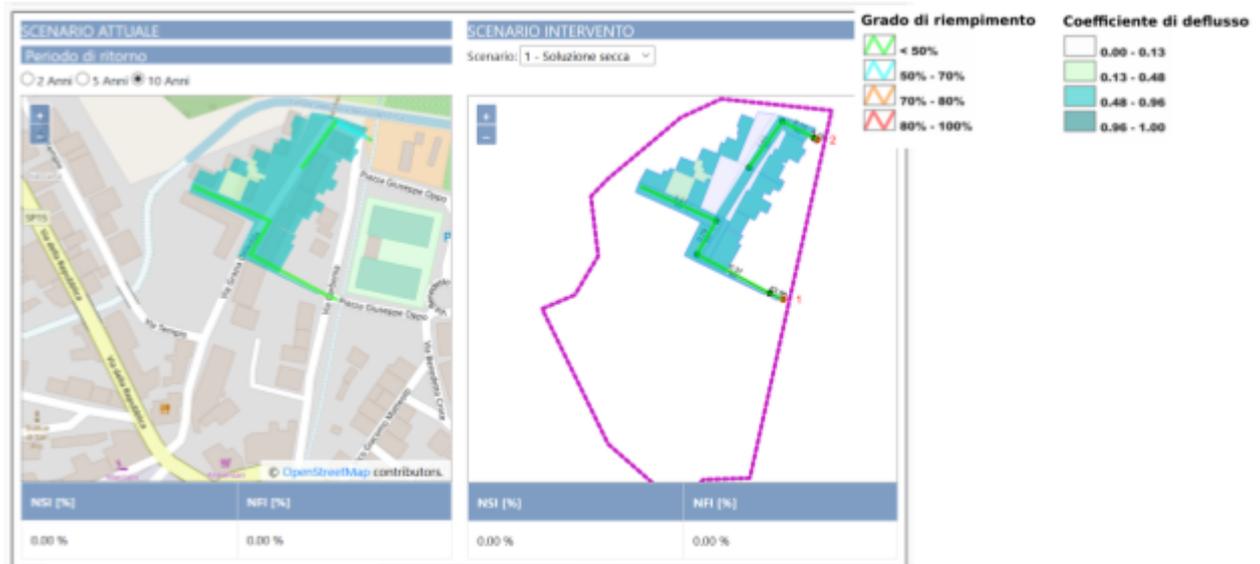


Figure 26: Carte de l'état actuel du risque hydraulique (à gauche) et du risque résiduel dans le scénario "systèmes secs" (à droite) pour le cas d'étude de Via Grazia Deledda objet de l'intervention COLANDER et indicateurs de la fonctionnalité du réseau de drainage (NSI - Network Stress Index ; NFI - Node Flooding Index) pour l'événement affectant le projet avec une période de retour de 10 ans. En haut à droite se trouve la légende des éléments (niveau de remplissage des conduites et coefficient de ruissellement des sous-bassins) indiqués dans la carte.

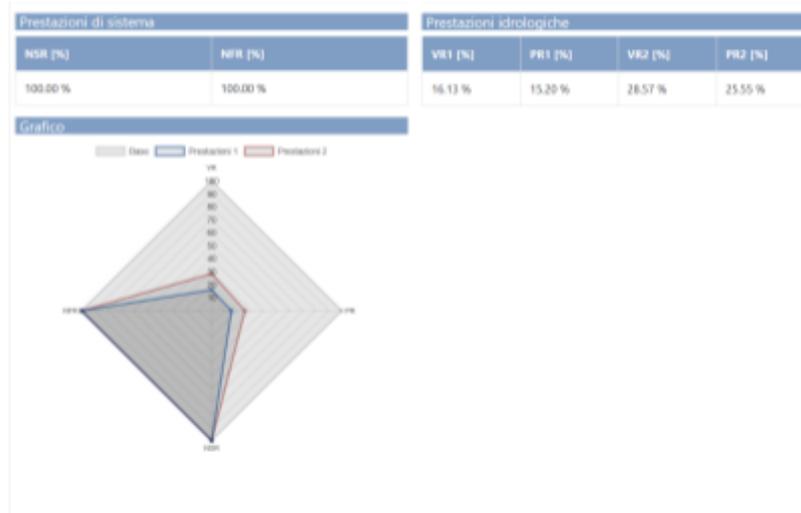


Figura 27: Performance du système (NSR - Network Stress Reduction et NFR - Node Flood Reduction), performance hydrologique (VR - Volume Reduction et PR - Peak Flow Reduction) et graphique radar correspondant dans le scénario "systèmes secs" pour le cas d'étude de Via Grazia Deledda objet de l'intervention COLANDER et pour l'événement du projet avec une période de retour de 10 ans.

5.2 Scénario avec Systèmes humides

Bien qu'il n'y ait pas de risque hydraulique dans l'état actuel, l'intervention proposée dans le scénario "systèmes humides" est efficace pour réduire l'impact environnemental sur le récepteur final. En particulier, l'intervention proposée s'avère efficace pour réduire de manière significative à la fois les débit à son sommet et les volumes déversés dans le récepteur, améliorant ainsi les conditions d'écoulement du réseau en aval. Les indicateurs de

performance relatifs aux conditions d'écoulement dans le réseau sont de 100 % pour tous les événements les événements du projet caractérisés par des périodes de retour de 2, 5 et 10 ans, comme prévu compte tenu de l'absence de condition de risque de l'état actuel.

L'intervention proposée dans le scénario "systèmes humides" est également efficace pour restaurer partiellement le cycle hydrologique naturel avec les mêmes performances hydrologiques que celles observées dans le scénario "systèmes secs". Pour l'événement le plus grave du projet, caractérisé par une période de retour de 10 ans, les performances hydrologiques des deux sections de fermeture sur le récepteur final sont confirmées comme étant appréciables avec des valeurs respectivement égales à environ 16% pour le volume, VR, et 29% pour le débit de pointe, PR pour une section et environ 15% et environ 26% pour l'autre section (voir Figure 29).

Les solutions conçues et prévues dans le cadre de l'intervention pilote COLANDER sont donc confirmées comme étant hydrologiquement et hydrauliquement efficaces indépendamment de la condition initiale d'humidité, c'est-à-dire efficaces même en cas d'événements intenses qui se produisent à une courte distance temporelle d'événements de précipitations encore moins graves. Cette hypothèse donne aux résultats obtenus en termes de restauration du cycle hydrologique et de minimisation de l'impact environnemental un degré d'incertitude minimum ou une fiabilité élevée.

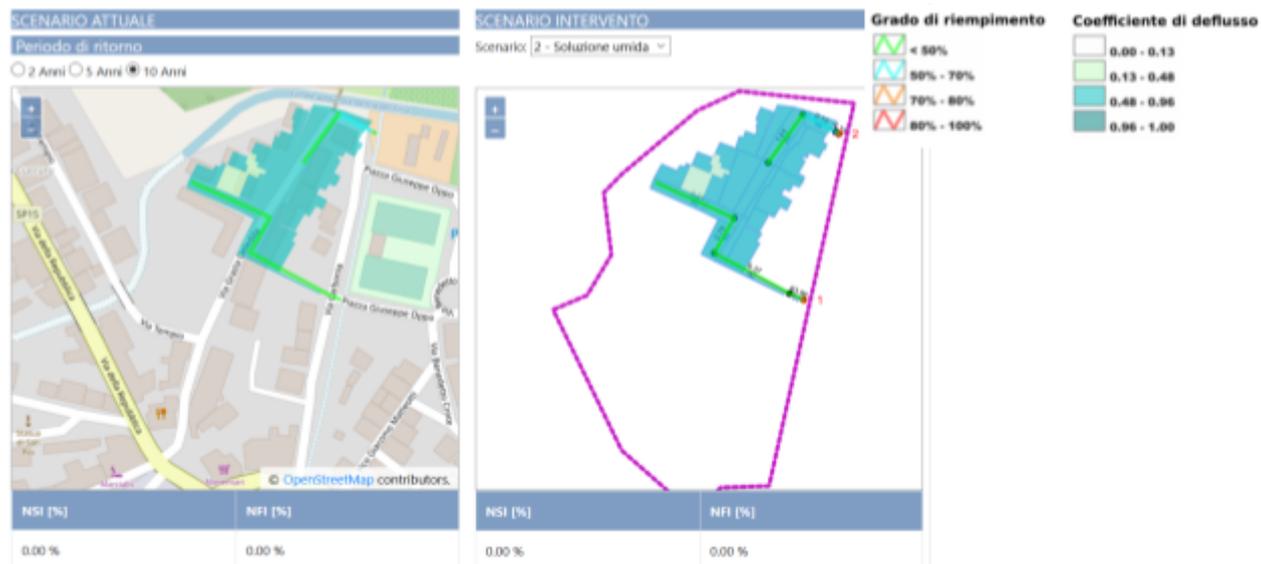


Figure 28: Carte de l'état actuel du risque hydraulique (à gauche) et du risque résiduel dans le scénario "systèmes humides" (à droite) pour le cas d'étude de Via Grazia Deledda objet de l'intervention COLANDER et indicateurs de la fonctionnalité du réseau de drainage (NSI - Network Stress Index ; NFI - Node Flooding Index) pour l'événement affectant le projet avec une période de retour de 10 ans. En haut à droite se trouve la légende des éléments (niveau de remplissage des conduites et coefficient de ruissellement des sous-bassins) indiqués dans la carte.

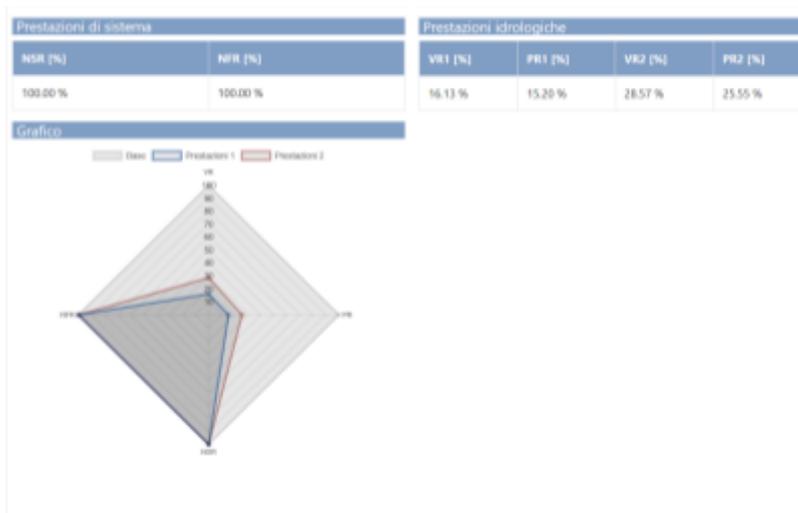


Figure 29: Performance du système (NSR - Network Stress Reduction et NFR - Node Flood Reduction), performance hydrologique (VR - Volume Reduction et PR - Peak Flow Reduction) et graphique radar correspondant dans le scénario "systèmes humides" pour le cas d'étude de Via Grazia Deledda objet de l'intervention COLANDER et pour l'événement du projet avec une période de retour de 10 ans.

6 Conclusions

L'analyse des conditions de risque hydraulique résiduel du cas d'étude sarde a été réalisée à l'aide de la plateforme TRIG-Eau, développée dans le cadre du projet. Les résultats spécifiques liés au cas d'étude du bloc de Via Grazia Deledda ont confirmé l'efficacité hydrologique et hydraulique de l'intervention pilote COLANDER.

De l'analyse des résultats des simulations pour l'état actuel, il ressort une condition de risque hydraulique zéro; en particulier, le réseau de drainage a été conçu de manière cohérente avec l'événement décennal du projet.

Après avoir vérifié la faible perméabilité du site avec une présence limitée d'espaces verts, l'intervention pilote COLANDER a prévu la construction de trottoirs drainants pour les aires de repos et de jardins de pluie pour le stockage temporaire des eaux de pluie avec le double objectif d'améliorer l'efficacité du drainage et d'augmenter le potentiel écologique urbain.

L'analyse des résultats concernant l'état du risque hydraulique résiduel montre que l'intervention pilote COLANDER est efficace au niveau environnemental, en particulier la réduction significative des débits d'écoulement météoriques en termes de volumes et de débits à son sommet a un impact positif non seulement sur le réseau mais aussi sur le récepteur final et en général sur l'utilisabilité de la zone.

Le soluzioni progettate e previste nell'intervento pilota COLANDER si confermano inoltre idrologicamente ed idraulicamente efficaci indipendentemente dalla condizione di umidità iniziale, ovvero efficaci anche nel caso di eventi intensi che occorrono con breve distanza temporale da eventi di precipitazioni anche meno severi.

Les solutions conçues et planifiées dans le cadre de l'intervention pilote COLANDER sont également confirmées comme étant efficaces sur le plan hydrologique et hydraulique, indépendamment de la condition initiale d'humidité, c'est-à-dire efficaces même en cas d'événements intenses qui se produisent à une courte distance temporelle d'événements de précipitations encore moins graves.

Références bibliographiques

- Ercolani, G., Chiaradi, E.A., Gandolfi, C., Castelli, F., Masseroni, D., "Evaluating performances of green roofs for storm water runoff mitigation in a high flood risk urban catchment", *Journal of Hydrology*, 566, 830-845, 2018.
- Keifer, D.J., Chu, H.H., "Synthetic Storm Pattern for Drainage Design," *ASCE Journal of the Hydraulics Division*, Vol. 83 (HY4), pp: 1332.1-1332.25, 1957.
- Palla, A., Gnecco, I. "Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale", *J. Hydrol.*, 528, 361-368, 2015.
- Palla, A., Gnecco, I., Carbone, M., Garofalo, G., Lanza, L.G., Piro, P. "Influence of stratigraphy and slope on the drainage capacity of permeable pavements: laboratory results", *Urban Water J.*, 12(5), 394-403, 2015.
- Rossman, L.A., 2010. *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0*, EPA/600/R-05/040, US EPA National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, Ohio, USA.
- SCS. "SCS National Engineering Handbook", Section 4. Hydrology, Soil Conservation Service, US Department of Agriculture: Washington, DC, 1972.