

Scénarios d'atténuation du risque hydraulique résiduel pour le cas d'étude en PACA (France)

Report n.3 - 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	7
1.4 Données pluviométriques	7
2 Implémentation du modèle simplifié pour les risques hydrauliques IDRORES	8
2.1 Schématisation des éléments	9
2.2 Paramètres hydrologiques-hydrauliques des éléments	10
3 L'état actuel des risques	11
4 Actions pour l'atténuation des risques hydrauliques	13
4.1 Pavés drainants	14
4.2 Zones de biorétention	15
4.3 Bassin de rétention	16
4.4 Scénarios d'intervention	19
5 Résultats	19
5.1 Scénario avec systèmes secs	20
5.2 Scénario avec systèmes humides	23
6 Conclusions	25
Références bibliographiques	25

Introduction

Ce document constitue le Report n.3 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 Hyères, sélectionnée sur le territoire PACA en France.

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 l'installation de pavés drainants et de bassins de rétention ;
- La cinquième section décrit la condition de risque hydraulique résiduel à savoir la condition de risque post-installation des systèmes proposés. 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 bassin urbain situé à l'est de Avenue Ambroise Thomas, délimité au nord par le Casino des Palmiers et au sud par la piscine municipale de la municipalité de Hyères, ci-après dénommé "Bassin Est de l'Avenue Ambroise Thomas," a été sélectionné comme cas d'étude dans la région PACA - Provence-Alpes-Côte d'Azur (France) pour l'application du modèle de risque hydraulique résiduel développé dans le cadre du projet T.R.I.G-Eau.

Le Bassin Est de l'Avenue Ambroise Thomas est traversé dans le sens Est-Ouest par une importante infrastructure, la route nationale DN98, tandis que la viabilité au service de la zone suit essentiellement un réseau à grille Nord-Sud et Est-Ouest. Les zones résidentielles et les zones d'établissement commerciale et de services alternent dans le bassin, qui est donc une zone d'étude optimale pour la diversification des zones concernées.

La figure 1 montre l'orthophoto de la zone d'étude avec un accent sur le sous-bassin urbain sélectionné comme cas d'étude pour la région PACA (France)



Figure 1: Orthophotos de la zone d'étude dans la municipalité de Hyères (PACA-Francia): le bassin urbain à l'Est de l'Avenue Ambroise Thomas délimité au Nord par le Casino des Palmiers et au Sud par la piscine municipale. Source des données: RBD ORTHO 2017

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;
- Carte topographique;
- Canalisations et nœuds du réseau de drainage urbain;
- Subdivision en sous-bassins;
- Modèle numérique du terrain.

Les extraits des cartes ci-dessus sont présentés dans les figures 2 à 6.

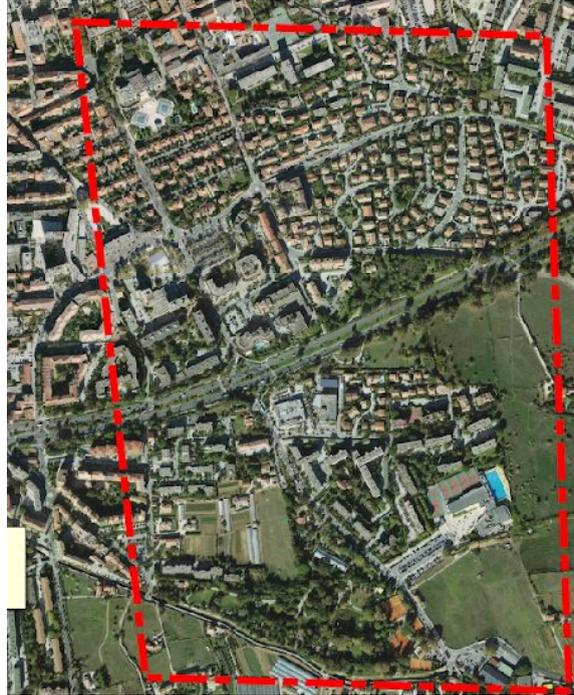


Figure 2: Extrait de l'orthophoto de la municipalité de Hyères et du périmètre de la zone d'étude: bassin Est de l'Avenue Ambroise Thomas . Source des données: BD ORTHO 2017.



Figure 3: Extrait de la carte topographique de la municipalité d'Hyères et périmètre de la zone d'étude: bassin Est de l'Avenue Ambroise Thomas. Source des données : geoportail.gouv.fr

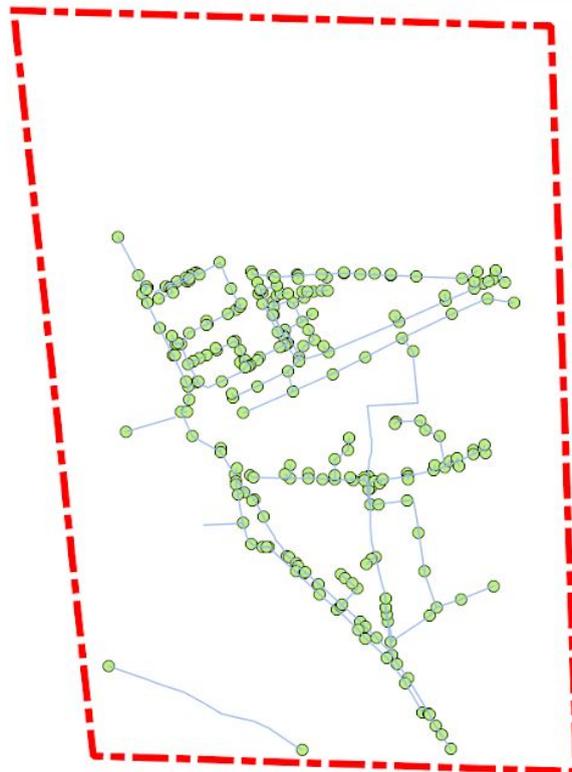


Figure 4: Carte des layer nœuds et canalisations de la zone d'étude: bassin Est de l'Avenue Ambroise Thomas. Source des données Métropole Toulon Provence

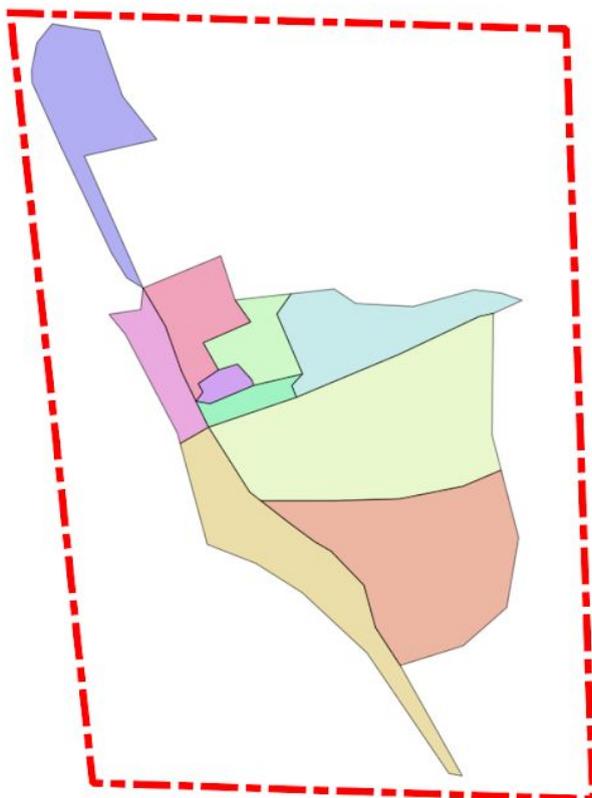


Figure 5: Carte de layer Sous-bassins de la zone d'étude: bassin Est de l'Avenue Ambroise Thomas. Source des données Métropole Toulon Provence

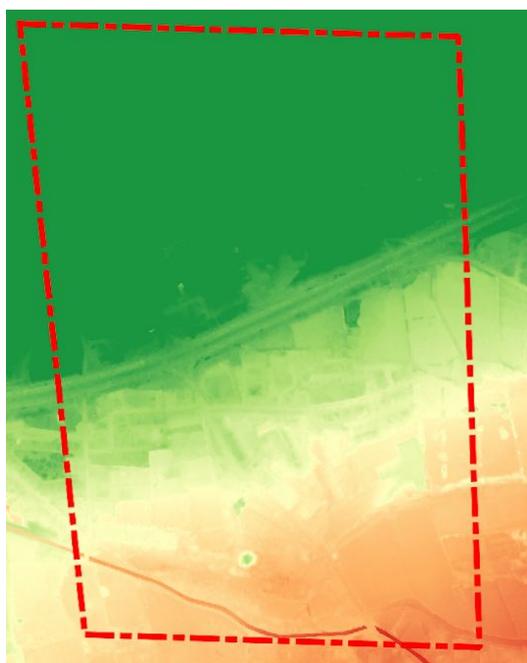


Figure 6: Extrait du Modèle numérique du terrain (1m x 1m) et périmètre de la zone d'étude: bassin est de l'avenue Ambroise Thomas (périmètre en pointillés rouges). Source des données: Métropole Toulon Provence

1.3 Perméabilité de la zone de pré-intervention COLANDER

Pour l'analyse de la perméabilité de la zone, des orthophotos ont été utilisées, en particulier les surfaces reconnaissable comme toits, routes et parkings ont été classées comme zones imperméables, tandis que les zones caractérisées par la présence de végétation ont été classées comme zones perméables.

Le tableau 1 montre les résultats relatifs à la perméabilité de la zone d'étude, en particulier le bassin Est de l'Avenue Ambroise est confirmé comme une zone partiellement perméable avec un pourcentage de zones perméables égal à 54%.

	Surface[ha]	Surface [%]
Surface imperméable	14.23	55%
Surface perméable	11.46	45%
Tot	25.7	100.0%

Tableau 1: Analyse de perméabilité pour la zone d'étude.

1.4 Données pluviométriques

Le régime des pluies pour la zone étudiée a été évalué par référence aux paramètres de la formule de Montana évalués par Météo France pour la période (1977-2005).

In particolare, la formula di Montana consente di stimare la precipitazione di progetto al variare del periodo di ritorno secondo una legge di potenza a due parametri nell'ipotesi di assenza di invarianza di scala.

En particulier, la formule de Montana permet d'estimer le précipitation du projet avec la variation de la période de retour selon une loi de puissance à deux paramètres dans l'hypothèse d'absence d'invariance d'échelle.

$$I(d, T) = a(T) \cdot d^{-b(T)}$$

où $I(d, T)$ est l'intensité du projet pour la durée d et pour la période de retour T .

Dans le Tableau suivant, pour les périodes de retour d'intérêt dans les évaluations du risque hydraulique dans un contexte urbain, les valeurs des paramètres $a(T)$ et $b(T)$ évaluées pour la zone d'étude sont indiquées.

Paramètres	Facteur de croissance			Période de return [ans]		
	2	5	10	2	5	10
Coefficiente a [mm/min ^{1-b}]	4.838	5.23	6.325			
Esponente b [-]	0.573	0.561	0.567			

Tableau 2: Paramètres de la formule de Montana pour la zone d'étude du sous-bassin Est de l'Avenue Ambroise Thomas, obtenus par Météo France à partir de l'analyse statistique sur la période (1977-2005)

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 7 montre les hyétogrammes du projet pour la zone d'étude du sous-bassin Est de l'Avenue Ambroise Thomas, évalués pour les périodes de retour de 2, 5 et 10 ans.

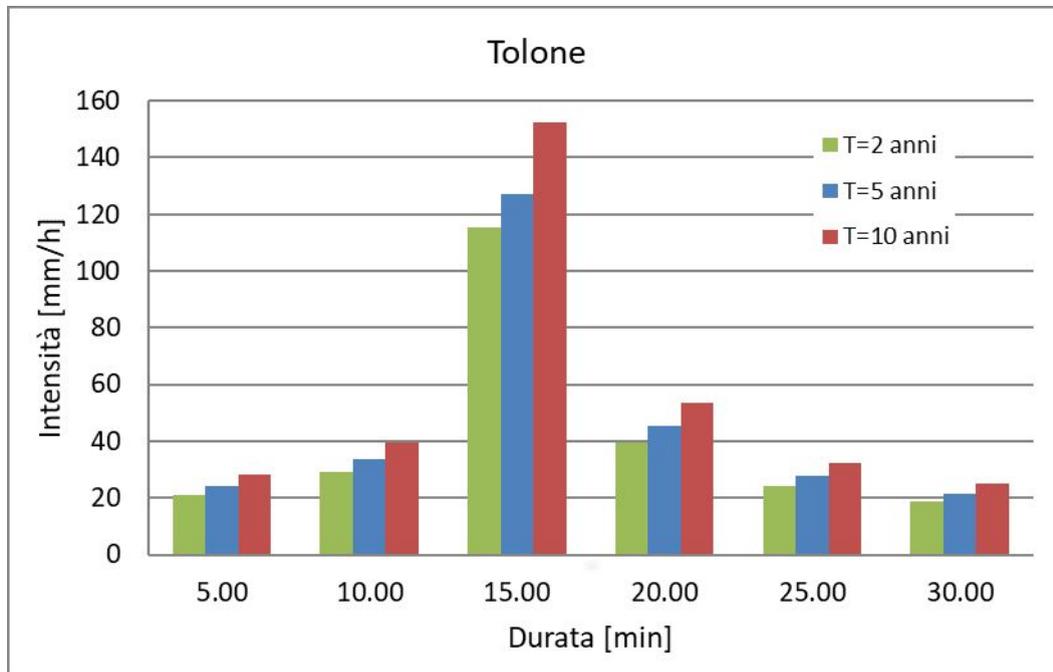


Figure 7: Hyétogramme du projet pour la zone d'étude du bassin Est de l'Avenue Ambroise Thomas pour les périodes de retour de 2, 5 et 10 ans.

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 le cas d'étude sur la base d'informations spatiales faisant référence à une schématisation des principaux sous-bassins en raison de l'extension importante de la zone.

2.2 Schématisation des éléments

Le sous-bassin Est de l' Avenue Ambroise Thomas a une extension totale de 25.7 ha et a été réintégré dans la plateforme de modélisation TRIG-Eau, en utilisant un schéma détaillé pour le réseau de drainage et les sous-bassins contribuable associés, en

particulier le critère de discrétisation spatiale pour le réseau a suivi la hiérarchie des sous-bassins définie par la Métropole Toulon Provence

Le bassin étudié a été discrétisé en 10 sous-bassins de forme et de superficie différentes; le critère de discrétisation spatiale se référait à la catégorie d'utilisation des sols prédominante. Le Tableau 3 montre la schématisation implémenté dans le portail en fonction de la catégorie d'utilisation des sols dominant et de l'extension en hectares et en pourcentage.

Label	Catégorie dominante	A (ha)	A (%)
S1	Casino	2.59	10.1%
S2	Résidentiel	1.49	5.8%
S3	Résidentiel	1.06	4.1%
S4	Carrefour	1.05	4.1%
S5	Espace Vert Ouvert	0.48	1.9%
S6	Résidentiel	2.56	10.0%
S7	Résidentiel et parc	7.13	27.8%
S8	Services	5.62	21.9%
S9	Zone résidentielle	3.41	13.3%
S10	Hotel Mercure	0.28	1.1%
	totale	25.69	100%

Tableau 3: Discrétisation spatiale des sous-bassins pour le cas d'étude du bassin Est de l'Avenue Ambroise Thomas.

En ce qui concerne le réseau de drainage, la schématisation pour l'implémentation dans le portail a concerné les principaux collecteurs du réseau de drainage existant. Les pentes, les diamètres et les nœuds des principaux collecteurs ont été implémentés dans le portail en se référant aux informations détaillées fournies par Métropole Toulon Provence et illustrées dans la figure 4.

La figure 8 montre le schéma des sous-bassins (polygones bleus) et du réseau de drainage (ligne noire) mis en œuvre dans la plateforme TRIG Eau pour le développement de l'étude de cas du bassin Est de l'Avenue Ambroise Thomas.

Pour la mise en place du réseau de drainage dans le portail TRIG Eau, 39 nœuds et 40 conduites ont été définis comme indiqué dans la figure 8. Dans la figure 8, la disposition du réseau de drainage des eaux de pluie est indiquée par un trait noir, où le diamètre de chaque canalisation est indiqué par une étiquette bleue (diamètre exprimé en cm) tandis que la pente est indiquée par une étiquette noire.



Figure 8: Implémentation dans la plateforme TRIG Eau du cas d'étude Bassin Est Avenue Ambroise Thomas. 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 indiqués dans les documents du projet, il a été fait référence à un coefficient n- Manning pour les conduites de $0.013 \text{ s/m}^{1/3}$ et pour les canaux rectangulaires ouverts de $0.021 \text{ s/m}^{1/3}$.

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 10 sous-bassins définis dans ce projet, les valeurs des paramètres hydrologiques et hydrauliques suivants sont attribuées comme indiqué dans le tableau 4.

Label	Catégorie dominante	% _{imp}	n_{imp} (s/m ^{1/3})	n_{perv} (s/m ^{1/3})
S1	Casino	80	0.011	0.13
S2	Résidentiel	80	0.011	0.13
S3	Résidentiel	65	0.011	0.13
S4	Carrefour	85	0.011	0.13
S5	Espace Vert Ouvert	50	0.011	0.13
S6	Résidentiel	40	0.011	0.13
S7	Résidentiel et parc	40	0.011	0.13
S8	Services	65	0.011	0.13
S9	Zone résidentielle	40	0.011	0.13
S10	Hotel Mercure	85	0.011	0.13

Tableau 4: Pourcentage de la surface imperméable, paramètres hydrologiques (CN) et hydrauliques (n -manning pour la partie imperméable et perméable) pour chaque sous-bassin de la zone d'étude du bassin Est de l'Avenue Ambroise Thomas

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 d'étude s'avère élevé car l'évaluation de l'insuffisance hydraulique même pour le plus petit événement avec une période de retour de deux ans montre une inondation généralisée et différentes parties du réseau en surcharge hydraulique.

L'état actuel du risque est déterminé par la conception du réseau existant, qui s'est manifestement déroulée par étapes successives et n'a pas toujours tenu compte de l'évolution

de la zone, ce qui a entraîné une hiérarchie des diamètres qui n'est pas cohérente avec le sens du débit et avec les goulets d'étranglement locaux dans les sections de collecte.

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 14, 15 et 16 respectivement pour les événements ayant une période de retour de 2, 5 et 10 ans.

En particulier, pour l'événement de la période de retour égale à 2 ans, 17 branches sur 40 ont été jugées critiques, c'est-à-dire avec un degré de remplissage maximal supérieur à 0,8, comme le confirme l'indicateur NSI égal à 42,5 %, et des inondations ont été observées dans 13 des 39 nœuds, comme le montre l'indicateur NFI égal à environ 33 % (voir figure 9).

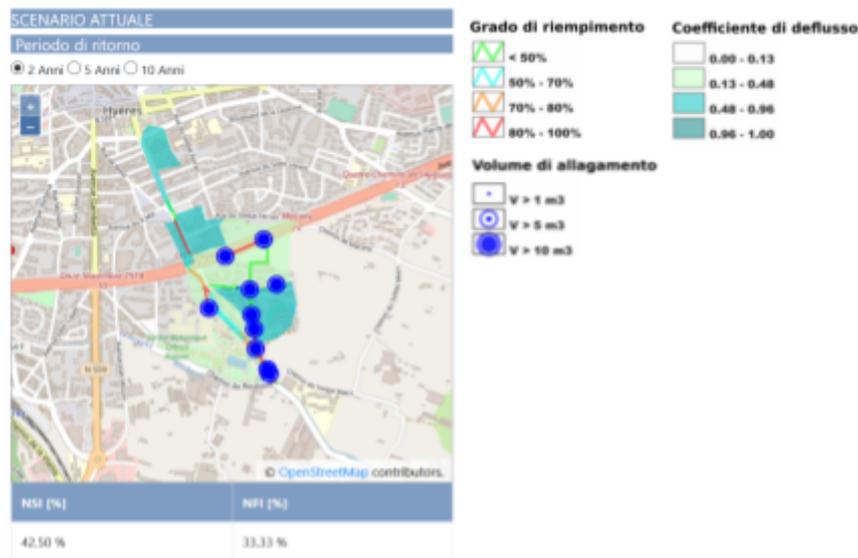


Figure 9: Carte de l'état actuel du risque hydraulique pour le cas d'étude Bassin Est Avenue Ambroise Thomas et indicateurs de la fonctionnalité du réseau de drainage (NSI - Network Stress Index ; NFI - Node Flooding Index) pour l'événement du projet avec une période de retour de 2 ans. En haut à droite se trouve la légende des éléments (niveau de remplissage des conduites et coefficient d'écoulement des sous-bassins) indiqués sur la carte.

Pour les événements de la période de retour de 5 et 10 ans, il existe des problèmes critiques plus répandus concernant l'état des écoulements dans les conduites avec respectivement 18 et 21 branches sur 40 avec un degré maximum d'inondation supérieur à 0,8 comme le confirment les indicateurs NFI de, respectivement, 45% et 50%; tandis que les inondations restent sensiblement inchangées en termes de nombre de nœuds inondés bien que les volumes d'inondation augmentent comme le confirment les indicateurs NFI de, respectivement, 33% et 36% (voir figure 10 et figure 11).



Figure 10: Carte de l'état actuel du risque hydraulique pour le cas d'étude Bassin Est Avenue Ambroise Thomas 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.

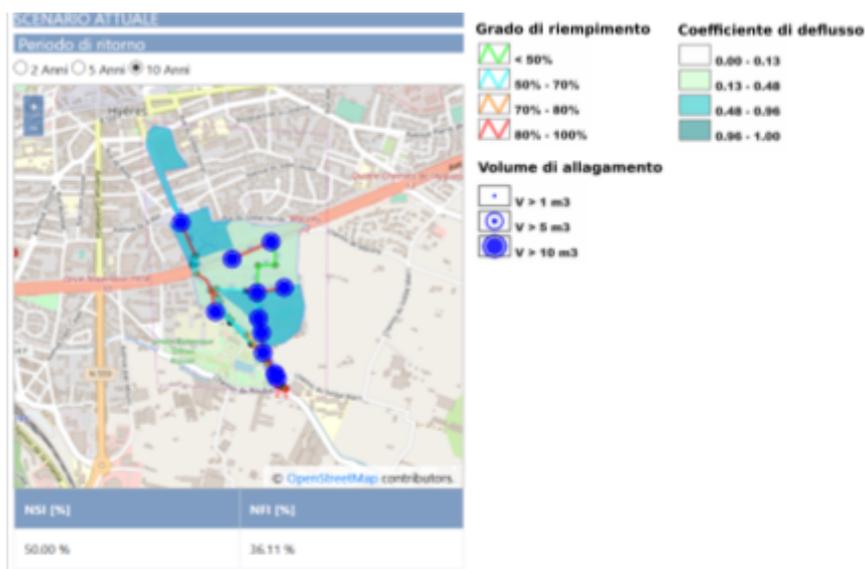


Figure 11: Carte de l'état actuel du risque hydraulique pour le cas d'étude Bassin Est Avenue Ambroise Thomas et indicateurs de la fonctionnalité du réseau de drainage (NSI - Network Stress Index ; NFI - Node Flooding Index) pour l'événement du projet avec une période de retour de 10 ans. En haut à droite 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 prévue pour l'atténuation du risque hydraulique dans le cas d'étude est la réalisation de pavés drainants pour les aires de repos, de zones de biorétention pour desservir le réseau routier principal et d'un bassin de rétention étendu 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.

4.1 Pavés drainants

L'implémentation des pavés drainants dans le modèle de risque résiduel se fait à l'aide du module LID - Permeable Pavement implémenté nativement dans le logiciel EPA SWMM (Rossmann, 2010); les paramètres géométriques et hydrauliques ont été imputés par rapport à la solution technique supposée.

Les aires de repos carrossables de la figure 12 sont converties en pavés drainants à construire avec des autobloquants en béton poreux selon le schéma de pose de la figure 13. Les paramètres de modélisation relatifs au schéma de PP se référant à l'aire carrossable ont été attribués conformément à la stratigraphie et aux données de la littérature (Palla et Gnecco, 2015). Le tableau 5 présente les principaux paramètres hydrauliques relatifs aux aires de repos réalisées en pavé drainant avec autobloquants en béton poreux - implémentées dans le portail TRIG Eau selon le schéma PP.



Figure 12 Retour dans la plateforme TRIG Eau du système de pavés perméables (zones vertes) à réaliser dans le bassin Est de l'Avenue Ambroise Thomas

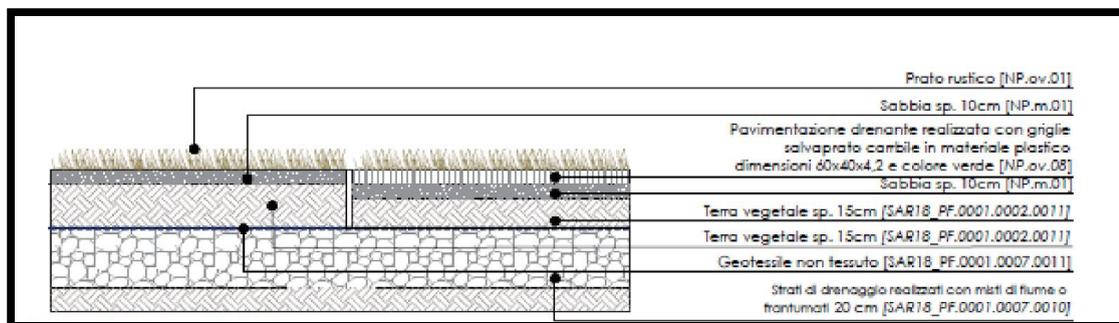


Figure 13: Stratigraphie de l'aire de stationnement en pavé drainante avec des autobloquants en béton poreux (Palla et al., 2015)

Pavé PP1	épaisseur [mm]	Index vide [-]	Perméabilité [mm/h]
Pavé	60	0.18	9000
Couche d'accumulation drainante	200	0.6	1000

Tableau 5: Paramètres assignés pour la modélisation des aires de repos en pavé drainant avec des autobloquants en béton poreux- implémentées dans le portail TRIG Eau selon le schéma PP1.

4.2 Zones de biorétention

L'implémentation des zones de biorétention, dans le modèle de risque résiduel, se fait à l'aide du module LID - Bioretention Cell implémenté nativement dans le logiciel EPA SWMM (Rossmann, 2010); les paramètres géométriques et hydrauliques ont été imputés par rapport à la solution technique supposée.

Les espaces verts à proximité du réseau routier principal de la figure 12 sont converties en zones de biorétention à construire selon le schéma d'installation illustré à la Figure 13. Les paramètres de modélisation relatifs au schéma BC se référant aux zones de biorétention ont été attribués conformément à la stratigraphie et aux données de la littérature (Huber, 2010). Le tableau 6 présente les principaux paramètres hydrauliques relatifs aux zones de biorétention implémentées dans le portail TRIG Eau selon le schéma PP1.



Figure 14 Retour dans la plateforme TRIG Eau du système de zones de biorétention à réaliser dans le bassin Est de l'Avenue Ambroise Thomas

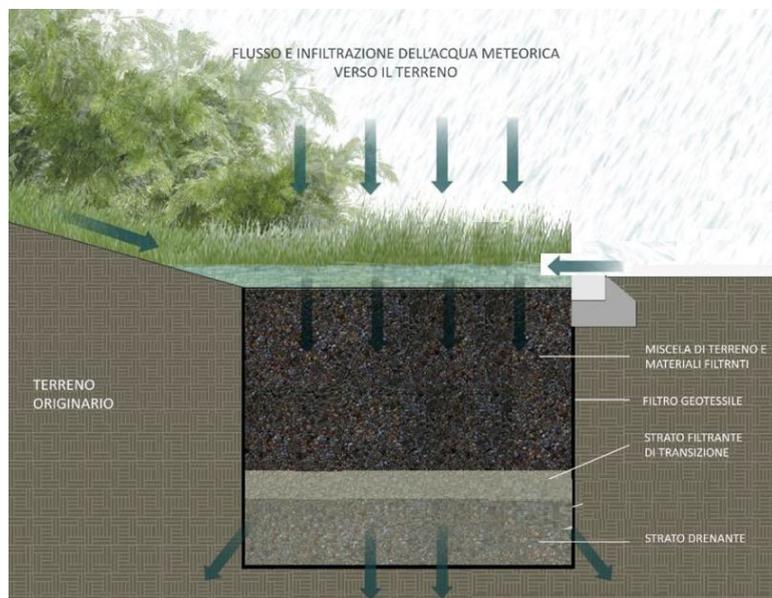


Figure 15: Stratigraphie de zones de biorétention implémentées dans le portail TRIG Eau au moyen du schéma nommé BC (schéma Huber, 2010).

Zones Biorétention BC	épaisseur [mm]	Index vide [-]	Perméabilité [mm/h]
Surface	30	-	-
Sol	100	0.52	150
Couche d'accumulation drainante	500	0.4	1000

Tableau 6: Paramètres assignés pour la modélisation des zones de biorétention implémentées dans le portail TRIG Eau selon le schéma BC.

4.3 Bassin de rétention

Pour le cas d'étude, la construction de deux bassins de rétention a également été prévue, comme le montre les figures 16 et 17 le premier bassin de rétention DP1 sera capable de gérer les débits générés par les zones imperméables voisines, tandis que le second bassin de rétention DP2, de taille significative, deviendra le récepteur de toute la partie du réseau qui sera déconnectée.

Les bassins de rétention se distinguent des zones de rétention par l'extension de la zone déconnectée du réseau de drainage; en particulier, le bassin DP1 reçoit directement le ruissellement de surface collecté par une surface imperméable de 5730 m² (zone orange dans la figure 16) tandis que le bassin DP2, de grande extension, permet de déconnecter une zone de 113540 m² (zone bleue dans la figure 16).

Le bassin DP1 situé à l'intérieur de la zone d'étude est modélisé en détail à l'aide du module LID - Bioretention Cell nativement implémenté dans le logiciel EPA SWMM (Rossmann, 2010) tandis que le bassin DP2 situé en dehors de la zone d'étude est modélisé à l'aide du module Unit Storage.

Les paramètres géométriques et hydrauliques du bassin de retenue DP1 situé dans la zone d'étude ont été attribués par rapport à la solution technique supposée et illustrée dans la figure 17. Le tableau 6 présente les principaux paramètres hydrauliques de la zone de rétention implémentée dans le portail TRIG Eau selon le schéma DP1.



Figure 16: Retour dans la plateforme TRIG Eau du système de bassins de rétention (à gauche) à mettre en place dans le bassin Est de l'Avenue Ambroise Thomas avec les zones contributives correspondantes (à droite).

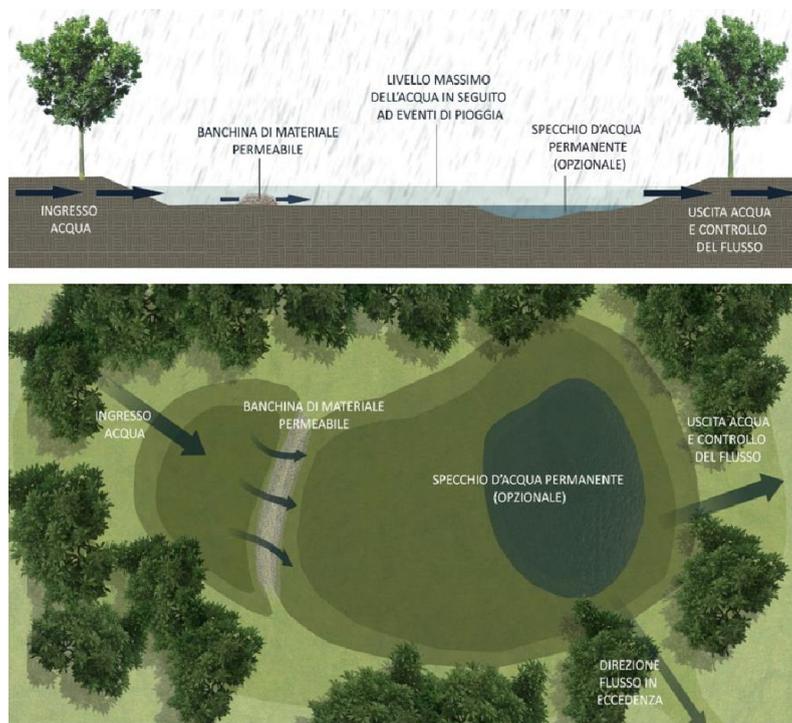


Figure 17 Schéma de conception pour la mise en œuvre des bassins de rétention implémentées dans le portail TRIG Eau au moyen du schéma nommé DP1 (schéma Huber, 2010).

Bassin de rétention DP1	Spessore [mm]	Indice vuoti [-]	Permeabilità [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 zones de rétention implémentées dans le portail TRIG Eau selon le schéma DP1

Le bassin DP2 situé en dehors de la zone d'étude est modélisé en détail à l'aide du module LID - Bioretention Cell nativement implémenté dans le logiciel EPA SWMM (Rossmann, 2010) tandis que le bassin DP2 situé en dehors de la zone d'étude est modélisé à l'aide du module Unit Storage.

Les paramètres géométriques du bassin de rétention DP2 situé en dehors de la zone d'étude ont été attribués en fonction du schéma de solution hypothétique. Le tableau 6 présente les principaux paramètres géométriques liés au bassin de rétention implémenté dans le portail TRIG Eau selon le schéma DP2; où une forme prismatique du réservoir, c'est-à-dire le volume du réservoir qui croît proportionnellement au tirant du réservoir, a été supposée pour des raisons de simplicité.

Bassin de rétention DP2	Aire [m ²]	Profondeur maximum [m]
Unit Storage	20000	0.8

Tableau 8: Paramètres assignés pour la modélisation des zones de rétention implémentées dans le portail TRIG Eau selon le schéma DP2

4.4 Scénarios d'intervention

La superficie totale de l'intervention est égale à 1,7 ha, c'est-à-dire que 7 % de la superficie a été convertie en systèmes de drainage durables. L'intervention proposée prévoit également la déconnexion du réseau de drainage d'environ 2,6 ha, qui représentent 10 % de la superficie.

Comme scénarios d'intervention, deux conditions limites pour l'exploitation des systèmes de drainage urbain durables mis en œuvre dans l'intervention prévue, les systèmes secs et les systèmes humides, ont été évaluées. L'analyse des résultats des deux scénarios limites était nécessaire pour établir le niveau d'incertitude de l'estimation du risque résiduel associé à l'intervention prévue.

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 condizione di rischio residuo viene valutata per i tre eventi di progetto relativi ai valori di periodo di ritorno pari a 2, 5 e 10 anni e per i due scenari di intervento "Vasche vuote" e "Vasche piene".

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

La condition de risque résiduel en aval de l'intervention, qui a impliqué l'installation de pavés poreux, de zones de biorétention et d'un bassin de rétention dans le scénario "Systèmes secs", a été sensiblement améliorée par rapport à la condition actuelle avec une période de retour de deux ans. L'intervention proposée s'avère moins efficace pour les événements de projet caractérisés par des périodes de retour de 5 et 10 ans en raison de la persistance de problèmes critiques qui ne peuvent être résolus dans le réseau existant.

En particulier, pour l'événement de la période de retour de 2 ans, dans le scénario "Systèmes secs", les criticités sont considérablement réduites, comme le confirme la valeur presque réduite de moitié de l'indicateur NFI 0% (voir Figure 18). Les conditions d'écoulement dans le réseau restent critiques avec encore 13 branches sur 40 qui ont un niveau de remplissage supérieur à 0,8 comme le confirme l'indicateur NSI égale à 33 %, comme le montre la Figure 18. L'intervention proposée s'avère efficace pour résoudre la criticité du réseau occidental alors qu'elle est moins efficace sur le réseau oriental où, en fait, les systèmes prévus sont plus petits en termes d'extension et de surfaces déconnectées (voir Figure 12, Figure 14 et Figure 16). L'intervention prévue n'est que partiellement efficace pour restaurer le cycle hydrologique naturel, en fait la performance hydrologique est nulle pour le réseau oriental (section 2 de la Figure 18) et se limite à une réduction de volume d'environ 33% pour le réseau occidental (section 1) comme le montre le graphique radar de la Figure 19.

Pour les événements du projet caractérisés par une plus grande sévérité, c'est-à-dire pour les périodes de retour de 5 et 10 ans, l'intervention proposée dans le scénario "Systèmes secs" est partiellement efficace comme le confirment la réduction du nombre de nœuds (voir Figure 20 et Figure 22) et la valeur appréciable de l'indicateur de réduction des inondations dans les nœuds NFR, égale à 25% et 8% respectivement (voir Figure 21 et Figure 23). D'autre part, la réduction du stress du réseau est très limitée, l'intervention proposée n'est pas en mesure de compenser les points critiques de la conception du réseau existant, tels que les goulots d'étranglement locaux et les tronçons manifestement sous-dimensionnés.

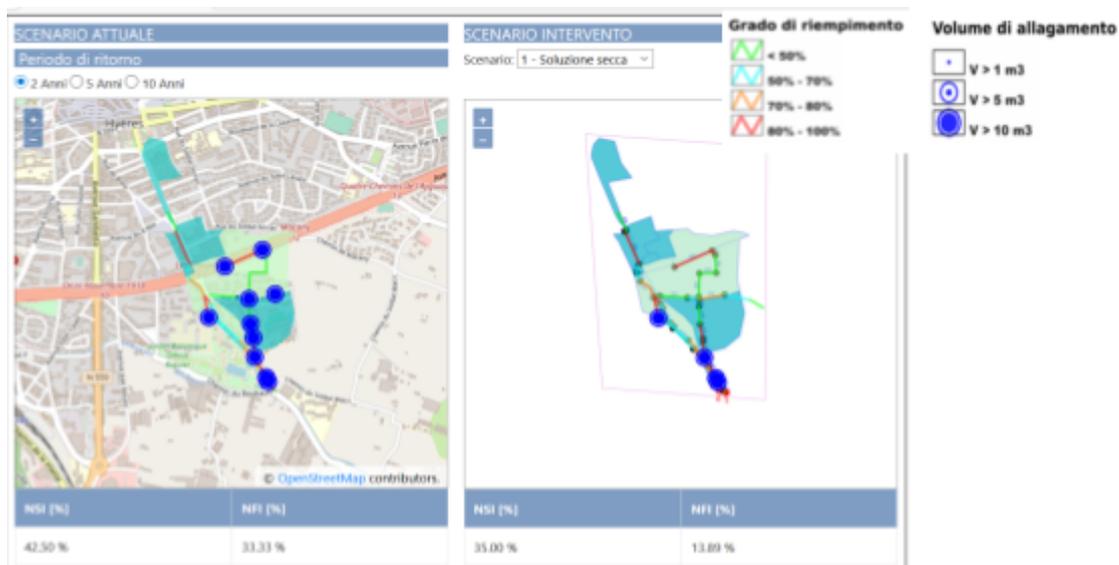


Figure 18: Carte de l'état actuel du risque hydraulique (à gauche) et du risque résiduel dans le scénario "Systèmes secs" (à droite) pour le cas d'étude du bassin Est de l'Avenue Ambroise Thomas et indicateurs de la fonctionnalité du réseau de drainage (NSI - Network Stress Index ; NFI - Node Flooding 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 19: 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 du Bassin Est de l'Avenue Ambroise Thomas et pour l'événement du projet avec une période de retour de 2 ans.



Figure 20: 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 du bassin Est de l'Avenue Ambroise Thomas 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.

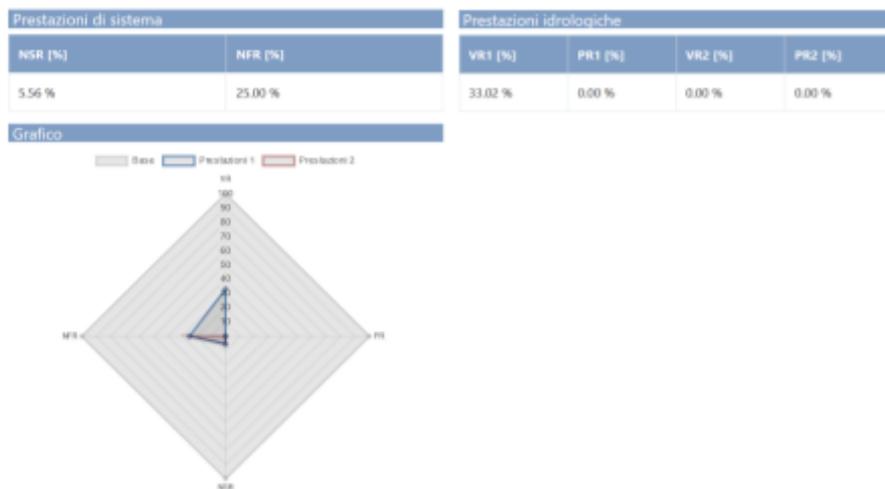


Figure 21: Performance du système (NSR - Network Stress Reduction et NFR - Node Flood Reduction), performance hydrologique (VR - Volume Reduction et PR - Peak Flow Reduction) et graphique radar correspondant dans le scénario "Systèmes secs" pour le cas d'étude du Bassin Est de l'Avenue Ambroise Thomas et pour l'événement du projet avec une période de retour de 5 ans.

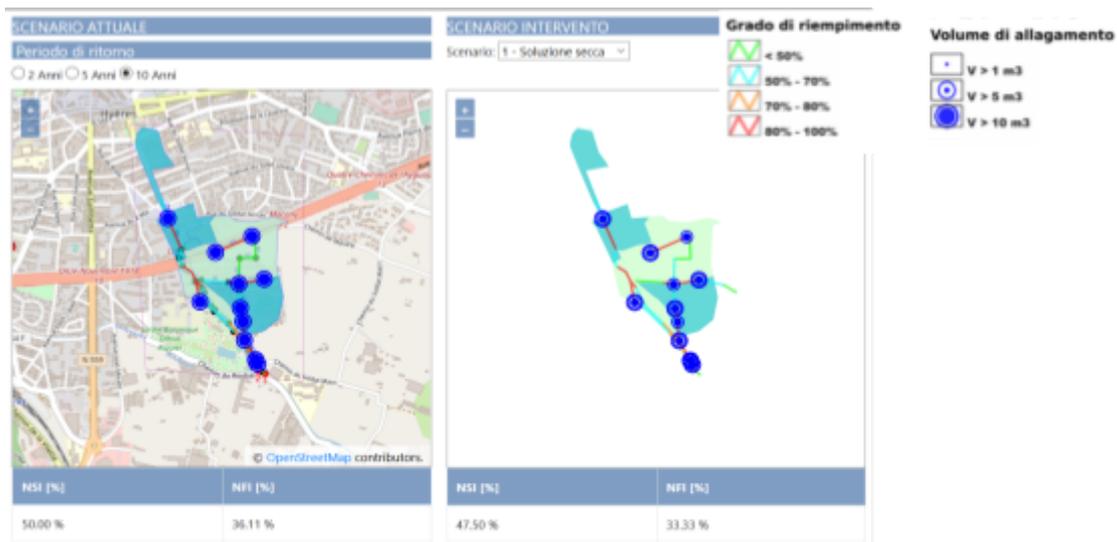


Figure 22: Carte de l'état actuel du risque hydraulique (à gauche) et du risque résiduel dans le scénario "Systèmes secs" (à droite) pour le cas d'étude du bassin Est de l'Avenue Ambroise Thomas et indicateurs de la fonctionnalité du réseau de drainage (NSI - Network Stress Index ; NFI - Node Flooding 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 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 du Bassin Est de l'Avenue Ambroise Thomas et pour l'événement du projet avec une période de retour de 10 ans.

5.2 Scénario avec Systèmes humides

La situation actuelle de risque résiduel en aval de l'intervention dans le scénario "Systèmes humides" n'est que marginalement améliorée par rapport au cas actuel. L'intervention proposée s'avère efficace pour réduire de manière significative les inondations localisées et les conditions de stress dans les branches uniquement pour l'événement de la période de retour de deux ans, alors qu'elle s'avère inefficace pour les événements plus graves.

L'intervention proposée dans le scénario "systèmes humides" est également partiellement efficace dans la restauration partielle du cycle hydrologique naturel avec les mêmes performances hydrologiques que celles observées dans le scénario "systèmes secs". L'intervention proposée s'avère efficace, comme déjà souligné dans le scénario "systèmes secs", pour résoudre la criticité du réseau occidental, alors qu'elle est moins efficace sur le réseau oriental où, en fait, les systèmes prévus sont plus petits en termes d'extension et de surfaces déconnectées (voir figure 12, figure 14 et figure 16).

Les solutions conçues et prévues dans le cadre de l'intervention permettent d'obtenir les mêmes performances quelle que soit la condition initiale d'humidité, c'est-à-dire qu'elles ne changent pas même en cas d'événements intenses qui se produisent à une courte distance de précipitations encore moins intenses. Cette hypothèse donne aux résultats obtenus un degré minimum d'incertitude c'est-à-dire une grande fiabilité.

En particulier, pour l'événement de la période de retour de 2 ans pour lequel l'intervention proposée s'avère efficace, dans le scénario "Systèmes humides", la criticité est considérablement réduite, comme le confirme la valeur presque réduite de moitié de l'indicateur NFI d'environ 14% (voir Figure 24). Les conditions de ruissellement dans le réseau restent critiques, 14 branches sur 40 ayant toujours un niveau de remplissage supérieur à 0,8, comme le confirme l'indicateur NSI de 35 %. La performance du système est cependant

significative pour l'événement biennal et se confirme à environ 18% pour la réduction du stress du réseau (NSR) et à environ 56% pour la réduction des inondations (NFR) ; alors que la performance hydrologique est nulle pour le réseau oriental (section 2) et pour le réseau occidental (section 1), seule une réduction de volume d'environ 33% est observée, comme l'illustre le graphique radar de la figure 25.



Figure 24: 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 du bassin Est de l'Avenue Ambroise Thomas 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.

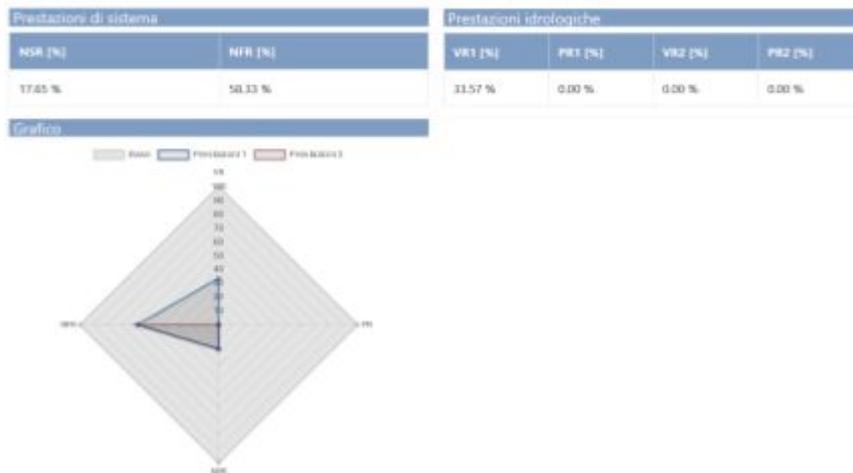


Figure 25: Performance du système (NSR - Network Stress Reduction et NFR - Node Flood Reduction), performance hydrologique (VR - Volume Reduction et PR - Peak Flow Reduction) et graphique radar correspondant dans le scénario "Systèmes humides" pour le cas d'étude du Bassin Est de l'Avenue Ambroise Thomas et pour l'événement du projet avec une période de retour de 2 ans.

6 Conclusions

L'analyse des conditions de risque hydraulique résiduel du cas d'étude français a été réalisée à l'aide de la plateforme TRIG-Eau, développée dans le cadre du projet.

L'analyse des résultats de simulation pour l'état actuel fait apparaître une situation de risque hydraulique élevé; en particulier, il y a de nombreuses inondations également localisées pour l'événement du projet avec une période de retour de deux ans. Après avoir vérifié la bonne perméabilité du bassin urbain avec une part de zones perméables égale à environ 45% de la surface totale et avec une présence importante de zones vertes, on a pu établir que l'état actuel de risque hydraulique élevé était dû à la conformation du réseau existant. En particulier, la conception du réseau existant a été réalisée par phases successives et n'a pas toujours tenu compte de l'évolution de la zone, ce qui a entraîné une hiérarchie des diamètres qui n'était pas cohérente avec la direction de l'écoulement et avec le rétrécissement local des sections de collecteurs.

La condition de risque résiduel en aval de l'intervention, qui a impliqué l'installation de pavés poreux, de zones de biorétention et d'un bassin de rétention dans le scénario, s'est révélée sensiblement améliorée par rapport à la condition actuelle de l'événement avec une période de retour de deux ans. L'intervention proposée s'avère moins efficace pour les événements de projet caractérisés par des périodes de retour de 5 et 10 ans en raison de la persistance de problèmes critiques qui ne peuvent être résolus dans le réseau existant.

Les effets observés sur les conditions de ruissellement du réseau peuvent être résumés comme une atténuation des conditions de surcharge des sections en amont du réseau occidental avec des conditions de risque résiduel acceptables pour l'événement de précipitation caractérisé par une période de retour plus modeste ($T=2$ ans) alors que d'autres interventions devraient être envisagées pour l'adaptation du réseau oriental et des sections terminales.

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.
- Huber, J., "Low Impact Development: A Design Manual for Urban Areas", University of Arkansas Press, 227 pp., 2010.
- 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.