

NeatWork, un logiciel d'aide à la conception à coût minimal de réseaux d'adduction d'eau potable soumis à une demande intermittente.

Gilles Corcos¹ et Jean-Philippe Vial², juin 2020.

Résumé :

NeatWork est un outil novateur qui facilite la conception et l'analyse des réseaux de distribution d'eau ayant pour origine un réservoir et pour extrémités les robinets mis à la disposition des consommateurs. Il a été développé pour répondre aux besoins spécifiques de APLV, une ONG qui aide de petites communautés rurales pauvres et dispersées à satisfaire leur droit à l'eau potable. Sa caractéristique est qu'il intègre les intérêts du constructeur, du bailleur de fonds et des utilisateurs. L'originalité de son approche est de tenir compte du comportement aléatoire des utilisateurs qui ouvrent ou ferment leurs robinets à leur guise. Cette perspective s'impose lorsqu'il n'est pas possible d'agréger les prélèvements d'eau qui sont de nature stochastique pour les remplacer par une moyenne quasi-déterministe. Pour faciliter la compréhension des différences entre une approche déterministe et une approche probabiliste, l'exposé utilise alternativement l'une et l'autre méthodes pour concevoir en détail un réseau proposé dans [6] comme modèle d'application d'EPANET, un outil informatique d'accès libre et très populaire. Contrairement aux approches conventionnelles qui ne donnent qu'un aperçu sommaire des performances futures du projet, NeatWork fournit des garanties sur le service qui sera rendu aux utilisateurs. Ces fonctionnalités permettent d'affirmer que NeatWork est un outil également pertinent dans la conception de réseaux plus généraux que ceux considérés par APLV. A contrario, nous donnons en exemple un projet réalisé par APLV qui n'aurait pu être géré avec l'aide d'EPANET. Cet exposé vient en complément de publications détaillant la méthodologie de NeatWork. Une annexe ajoute des informations utiles dans la mise en œuvre du logiciel.

Remerciements : Les ingénieurs et techniciens de APLV, Jaime Alonso et Francisco Romero, ont mis en œuvre NeatWork depuis de nombreuses années. Ils ont ainsi contribué à sa validation et apporté des critiques constructives. Laurent Drouet a réalisé l'essentiel du développement informatique. Frédéric Babonneau a été une cheville ouvrière dans la conception des modèles. Thomas Dizier a été lors de son passage à APLV un utilisateur avisé et critique du logiciel. Le développement de NeatWork a été possible grâce au soutien de l'Université de Genève et de la société Ordecys. Enfin Erling Andersen, de la société Mosek, est remercié pour avoir mis à disposition gracieusement les moteurs d'optimisation sur lesquels reposent les calculs de NeatWork.

Introduction

NeatWork est un outil d'aide à la conception et à l'analyse des systèmes de distribution d'eau, depuis un réservoir jusqu'aux utilisateurs finaux. Il a été développé pour répondre aux besoins spécifiques de Agua Para la Vida, APLV en abrégé, qui est une ONG [1] ayant pour

¹ Co-fondateur de APLV. Professeur Emérite de University of California, Berkeley, USA.

² Professeur Emérite, Université de Genève, Suisse.

mission d'aider les communautés rurales très pauvres à satisfaire leur droit à l'eau potable. La méthodologie de NeatWork est détaillée dans l'article [3]. Le but de ce rapport est d'exposer l'approche de manière moins formelle et d'expliquer les raisons de ce choix dans le cas de APLV. Pour éclairer notre démarche, nous nous basons sur un exemple proposé à l'origine pour illustrer la mise en œuvre de EPANET [4] dans un manuel pédagogique édité par la Banque Mondiale [6]. Cet exemple constitue cependant un excellent support pour la mise en œuvre de deux approches différentes : un modèle déterministe basé sur une décomposition hiérarchique du réseau (étudié avec l'aide d'EPANET) et un modèle global probabiliste allant de la source aux utilisateurs finaux (conçu et simulé avec l'aide de NeatWork). La capacité de NeatWork de produire un réseau à coût minimum est exploitée pour proposer une alternative au dimensionnement original qui divise le coût plus que de moitié. Au terme de cette étude, nous concluons que NeatWork peut également apporter une aide dans la conception de réseau ayant les caractéristiques de l'exemple de [6].

Les communautés rurales auxquelles APLV apporte son soutien sont caractérisées par une population peu nombreuse, isolée et très dispersée. Le système d'adduction d'eau est un réseau en forme d'arbre, constitué de tuyaux protégés et de robinets. Un réservoir alimenté par une source est situé à l'origine ce réseau. Aux extrémités se trouvent des robinets adjacents aux habitations. Les habitants ont un usage élémentaire de l'eau fournie par des robinets. Ils recueillent l'eau avec des récipients ou s'en servent directement à la sortie du robinet pour se laver ou laver leur linge. Le système n'emploie pas d'autre force motrice que l'énergie potentielle de la gravité. Il s'ensuit que les différences de niveau entre le réservoir et les robinets, la longueur des canalisations et le type de tuyaux les équipant sont les éléments déterminants dans le calcul des écoulements dans le réseau.

Il y a un autre facteur à prendre en considération dans la conception d'un réseau : les besoins des utilisateurs et la façon dont s'expriment ces besoins. L'originalité de l'approche de NeatWork est de reconnaître que le comportement des utilisateurs est de nature aléatoire et qu'en conséquence l'état des robinets doit être décrit par un processus stochastique intermittent d'ouvertures et de fermetures. En effet, le bon sens indique que dans l'usage qu'ils font de l'eau, les habitants d'une maisonnée s'attendent à ne pas passer un temps excessif à prélever le quota d'eau dont ils ont besoin. A supposer que le système soit capable de leur assurer en toute occasion un débit à peu près constant, on peut estimer ce débit en ayant en tête que le temps requis pour remplir un récipient standard doit être raisonnable. Les normes communément adoptées dans ce genre d'étude pour quantifier les besoins en eau par personne permettent d'estimer ce temps et de s'apercevoir que le taux d'occupation du robinet³ est très inférieur à 100%. Il en résulte que peu de robinets sont ouverts simultanément et que la répartition des robinets ouverts est aléatoire. La très grande variété de configurations de robinets ouverts ou fermés dans l'utilisation quotidienne du réseau, peut nuire à la stabilité des débits et aboutir à un service de médiocre qualité. Dans la conception de réseaux du type décrit plus haut, il faut donc tenir compte d'une contrainte sur la qualité du service rendu, c'est-à-dire assurer un débit à peu près constant et identique à chaque utilisation. Le défi est de satisfaire cette contrainte tout en minimisant le coût des équipements à mettre en place. NeatWork utilise un modèle

³ Une valeur typique pour le besoin en eau est 70 litres par personne et par jour. APLV retient comme valeur raisonnable pour le débit 0,12 litres/seconde. Pour un robinet desservant une maisonnée avec 6 personnes, le taux d'occupation du robinet sera de l'ordre de 10% pendant l'heure de pointe.

probabiliste du comportement des utilisateurs. Il produit ainsi un réseau réalisant un compromis entre le coût de l'installation et la qualité du service et il en simule les performances.

Cette approche est radicalement différente de l'approche traditionnelle qui remplace le comportement aléatoire des usagers par une moyenne déterministe supposée équivalente. Comme nous venons de l'expliquer, cette équivalence n'a pas de sens au niveau d'un utilisateur individuel. En revanche, la demande consolidée de nombreuses habitations d'un même quartier, peut être considérée comme quasi déterministe. Pour justifier le recours à un modèle déterministe, l'approche traditionnelle, à laquelle s'attache EPANET, considère que le réseau est segmenté en une partie principale et des parties secondaires, ces dernières desservant les grappes d'habitations. La demande consolidée de chaque grappe devient alors une demande déterministe en chaque nœud de jonction. Cette modélisation permet le calcul des équipements nécessaires dans le réseau principal. En revanche, la détermination des équipements des sous-réseaux internes aux grappes n'est pas traitée explicitement. Il semble entendu, de manière implicite, que garantir un « certain niveau » de pression aux jonctions entre réseau principal et réseaux secondaires soit suffisant pour concevoir de « bons » réseaux secondaires.

Dans le cas des villages auxquels APLV apporte son concours, ces hypothèses ne sont pas recevables et c'est pourquoi nous considérons un réseau dans son intégralité et nous attachons, avec l'appui de NeatWork, à garantir un service d'une qualité quantifiable à un moindre coût d'installation. Le cas que nous avons repris de [6] pour illustrer notre travail est simple mais très intéressant. Il est conçu pour illustrer la mise en œuvre de EPANET à partir d'un modèle déterministe d'un réseau principal. Le réseau a deux niveaux. Au niveau supérieur, un réseau principal, en forme d'arbre, possède six nœuds servant de jonction à six réseaux secondaires indépendants. Les informations concernant la disposition des réseaux secondaires ne sont pas renseignés. Nous avons donc dû en imaginer les caractéristiques, leur disposition et la longueur des branches. Le cas ainsi modifié peut être traité avec l'approche probabiliste. Plusieurs dimensionnements du réseau sont générés par NeatWork mettant en lumière la relation qualitative qui existe entre le coût de l'installation et le service aux utilisateurs. Il apparaît ainsi qu'une réduction très substantielle du coût peut être obtenue sans dégradation significative du service apporté aux utilisateurs. Le traitement du cas repris de [6] démontre au passage que le champ d'application de NeatWork peut s'étendre à des situations différentes de celles pour lesquelles il a été conçu.

Le rapport est organisé comme suit. Nous présentons d'abord l'étude de cas. Ensuite, nous expliquons le mécanisme qui génère des demandes intermittentes aléatoires et en donnons la modélisation probabiliste. Nous présentons ensuite les modules NeatWork permettant de générer des modèles et de les simuler. Dans la partie consacrée à l'étude numérique, nous examinons d'abord le réseau existant dans lequel les choix de tuyaux pour chaque branche sont donnés comme dans [6]. Nous le faisons d'abord en mode déterministe (la demande en chacun des robinets est remplacée par sa moyenne équivalente) et ensuite en mode probabiliste. Il apparaît que les deux approches aboutissent, pour le réseau dimensionné comme dans [6], à des résultats presque identiques. Pour produire des alternatives de coût moindre, nous activons le module de conception de NeatWork dans le cadre probabiliste en ouvrant le choix des tuyaux à l'ensemble des tuyaux commerciaux répertoriés dans [6]. Le

coût du projet en termes de tuyaux est réduit de près de 60%, au détriment d'un accroissement très modéré de la variabilité des débits. Dans une dernière section précédant la conclusion, nous présentons une réalisation relativement récente de projet APLV. Nous pensons que cela peut aider le lecteur à se faire une meilleure idée du type de projets réalisés par APLV.

Les modèles et solutions mathématiques sont détaillés dans un article récent [3]. Le guide de l'utilisateur de NeatWork [2], bien qu'il soit dépassé, contient de nombreuses informations précieuses. Il convient enfin de signaler que les calculs complexes d'écoulement dans les simulations s'appuient sur le logiciel d'optimisation Mosek [5] mis gracieusement à disposition pour une distribution libre de NeatWork.

En annexe, nous avons rassemblé quelques extensions du thème principal du présent article. Tout d'abord, nous montrons que NeatWork peut simuler les débits dans un réseau avec des boucles et des demandes intermittentes. Nous donnons ensuite des recommandations générales pour l'utilisation de NeatWork et mentionnons un module complémentaire utile basé sur Excel. Nous reproduisons une liste de recommandations pour la mise en œuvre de NeatWork similaire à celle donnée dans [6]. Un dernier tableau résume les caractéristiques contrastées des modèles déterministes et probabilistes.

Le cas du village Esperenza

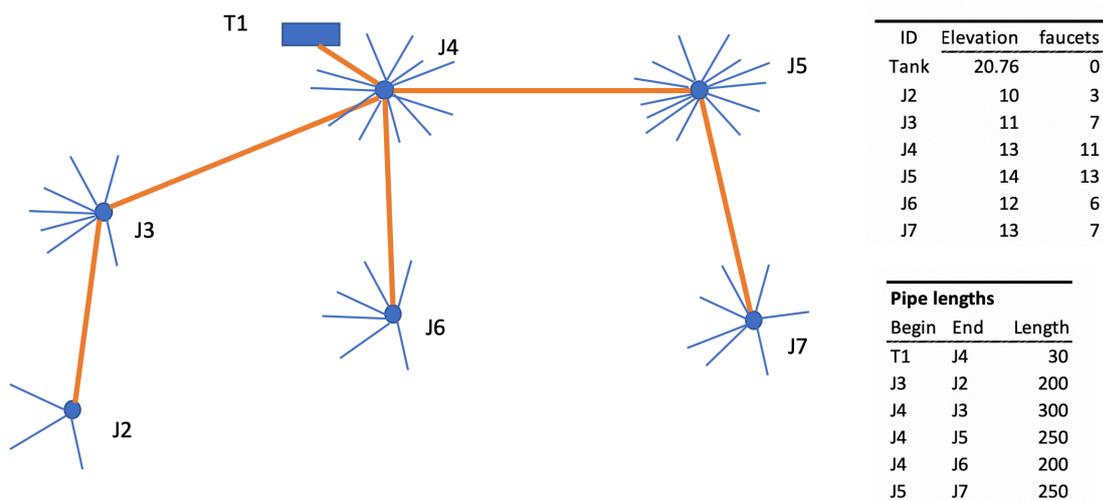
Notre objectif est d'utiliser NeatWork pour traiter aussi à fond que possible l'exemple du manuel de la Banque Mondiale. Nous utiliserons successivement les approches déterministe et probabiliste, de manière à contraster leurs mérites. L'exemple est celui d'*Esperenza*, un village de 1300 habitants aux Philippines, situé dans une zone au relief peu prononcé. L'eau s'écoule d'une source proche dans un réservoir surélevé. Ce dernier est relié au réseau principal qui a la forme d'un arbre, avec 6 nœuds, chacun assurant une connexion à un sous-réseau desservant plusieurs robinets publics. La disposition des sous-réseaux n'est pas mentionnée dans le document. La seule information disponible est le nombre de robinets publics que les sous-réseaux desservent. Chaque robinet public dessert 5 ménages abritant 5,3 personnes en moyenne. La consommation quotidienne d'eau est la même pour chaque habitant, mais la consommation d'eau varie au cours de la journée, depuis une faible consommation la nuit jusqu'à un pic le matin. Les demandes aux 6 nœuds de jonction fluctuent au cours de la journée, de la période de pic à la période d'étiage.

Le manuel [6] utilise le cas d'*Esperenza* comme un tutoriel pour la mise en œuvre de EPANET. Etant donné un réseau et son équipement en tuyaux, EPANET permet à l'utilisateur d'obtenir les débits, les pressions et les vitesses d'écoulement à plusieurs moments de la journée. Ces données peuvent fournir des indications à la personne élaborant le projet sur des améliorations possibles et une diminution des coûts. En revanche EPANET ne propose pas d'outil informatique pour cette étape d'amélioration. Lorsque le projet a des caractéristiques similaires à celles de *Esperenza*, à savoir une organisation hiérarchique avec un réseau primaire bien identifié et peu ou pas d'exigences relativement à la minimisation du coût de la tuyauterie, EPANET est efficient et convivial. Nous souhaitons illustrer le cas opposé où l'identification d'un réseau primaire n'est pas naturelle et où la planification des réseaux secondaires fait partie intégrante du projet. Le présent document ne propose pas

une étude comparative, voire une compétition entre les deux logiciels. Nous voulons plutôt montrer que NeatWork permet de collecter d'autres informations qui peuvent s'avérer essentielles à la réalisation de bons projets dans des contextes différents, comme ceux rencontrés par APLV. En prenant un exemple qui est loin des applications habituelles de NeatWork, mais peut-être plus en accord avec ce que la plupart des lecteurs connaissent, nous espérons faciliter la compréhension des fonctionnalités de NeatWork.

Disposition du réseau et données topographiques

Le graphique ci-dessous donne un aperçu de l'ensemble du réseau, du réservoir aux robinets qui se trouvent à l'extrémité des fines lignes émanant des nœuds de jonction J2 à J7.



Plan et données pour le système de distribution d'eau d'*Esperenza*.

Le réseau principal, représenté par des liens rouges, est entièrement documenté. En revanche, la disposition et la longueur des liens manquent pour tous les sous-réseaux. Nous ne connaissons que le nombre de robinets dépendants. Nous représentons les liens de jonction aux robinets par de fines lignes bleues et supposons que l'élévation de ces robinets est la même que celle de leur nœud de jonction.

Besoins en eau

Le cas détaille les demandes quotidiennes et horaires en eau. Les données sont basées sur des normes acceptées concernant l'allocation journalière par personne. Elles sont cumulées en fonction du nombre moyen de personnes par ménage et du nombre de ménages par robinet public.

Demande quotidienne / personne	60	litres
Nombre moyen de personnes par ménage	5.53	
Demande quotidienne / ménage	332	litres
Nombre moyen de ménages par robinet	5	
Nombre total de robinets	47	
Consommation totale dans la journée	78	m3
Consommation horaire moyenne (24 heures / jour)	3.25	m3

Demandes quotidiennes et demandes horaires moyennes en eau

La consommation d'eau n'est pas uniforme pendant la journée. La demande en heure de pointe est 2,5 fois supérieure à la moyenne et la période creuse ne représente qu'un cinquième de la moyenne. (Le manuel de la Banque mondiale donne les ratios pour les 24 heures de la journée. Le traitement extensif de ces informations nous écarterait de notre objectif principal.)

Heure de la journée	Pointe	Base	Creux
Consommation horaire (en mètres cubes)	8.125	3.25	0.65
Rapport à la consommation de base	2.5	1	0.2
Consommation horaire par robinet (en litres)	173	69	13.8
Moyenne des débits des robinets (en litres / sec,)	0.0480	0.0192	0.0038

Écoulements moyens aux en trois périodes.

À l'autre extrémité du réseau, le réservoir est une structure surélevée alimentée par une source avec un débit stable de 2,5 l/s, soit l'équivalent de 9 mètres cubes par heure. Son niveau inférieur est de 18 m et le niveau de l'eau peut atteindre 21,6 m. Ce niveau fluctue si la demande dépasse le débit entrant à certaines périodes. Cependant, les 2,5 l/s indiqués dans [6] dominent la demande de pointe horaire⁴. Par conséquent, le niveau de l'eau dans le réservoir ne devrait jamais descendre en dessous de son niveau maximum 21 mètres. Plutôt que d'essayer de résoudre cette contradiction, nous avons choisi de situer l'élévation de niveau d'eau dans le réservoir à 20,76 mètres, chiffre renseigné dans un des tableaux de résultats de [6]. Nous avons conservé ce chiffre dans toutes nos expériences et avons laissé de côté toute tentative de déterminer l'évolution du niveau de l'eau dans le réservoir.

Extension du réseau pour l'analyse globale

NeatWork base son approche sur le service rendu aux utilisateurs finaux. Plus précisément, il prend en compte le comportement aléatoire des utilisateurs, ce qui implique que les demandes sont intermittentes à chaque robinet. Pour permettre cette analyse il faut disposer des informations détaillées sur les réseaux de distribution secondaires, ce qui n'est malheureusement pas le cas pour *Esperanza*. Nous ne connaissons que le nombre de robinets rattachés à un même point de jonction et la demande moyenne par jour qui leur est associée. Pour rester dans le cadre de NeatWork, nous consolidons le réseau principal et les réseaux secondaires en un seul réseau allant du réservoir aux utilisateurs en bout de ligne. Les graphiques suivants montrent un sous-réseau imaginé à la jonction J7 ainsi qu'une vue globale du réseau étendu.

⁴ Les chiffres indiqués dans les données sont surprenants. Le débit entrant dans le réservoir pendant l'heure de pointe est supérieur à la demande en toutes périodes. L'eau déborderait constamment du réservoir et le niveau d'eau y serait toujours à son maximum. Ceci est contredit par le graphique de l'annexe A.33 qui illustre l'évolution de l'élévation de l'eau dans le réservoir sur une période de 72 heures. Un débit entrant de 1,5 l/s serait beaucoup plus raisonnable.

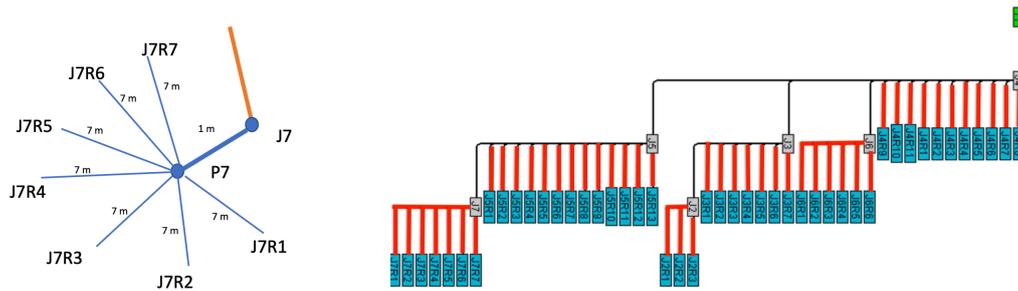


Image du réseau global.

Nous avons attribué des longueurs arbitraires aux arcs dans le sous-réseau. Les robinets d'un même sous-réseau donné sont déclarés être tous à la même distance du nœud de jonction. Cette distance en mètres est prise comme étant égale au nombre de robinets du sous-réseau. Par exemple, les sept robinets adjacents à J7 se trouvent chacun à 7 mètres de J7. Un calcul simple montre que la longueur totale ajoutée est de 277 m. Cet ensemble de données semi-réalistes sera utilisé dans l'approche probabiliste.

Équipement

Base de données sur les diamètres

De l'annexe A.36 à A.38 du manuel [6], nous retenons 8 tuyaux commerciaux en PVC, identifiés par les lettres de A à H. Les 5 derniers appartiennent à la classe 100 [1, A.36]. Seuls les tuyaux D à F sont utilisés dans le projet. Nous complétons la base de données avec les canalisations A, B et C de l'annexe [1, A.38] sous la rubrique "tuyaux supplémentaires". Ils ont des diamètres intérieurs plus petits et sont moins chers, ce qui est pertinent pour les sous-réseaux de terminaux. Pour les tuyaux D à H, nous sélectionnons la classe 100 plutôt que la classe 150. Cette dernière, plus coûteuse, résiste sans doute à des pressions statiques plus élevées. Compte tenu de la plage très limitée de valeurs des élévations, il est raisonnable de s'en tenir à la classe 100.

ID	Classification	Diameter	Cost
A	additional	0.020	85
B	additional	0.025	90
C	additional	0.032	125
D	Class 100	0.050	377
E	Class 100	0.075	391
F	Class 100	0.100	580
G	Class 100	0.150	974
H	Class 100	0.200	1315

Tuyaux disponibles pour le projet

Base de données des orifices

NeatWork utilise des orifices pour réguler la pression au robinet. (NeatWork et le présent article, utilisent comme unité de pression est le mètre d'eau, c'est-à-dire la pression exercée par une colonne d'eau de 1m dans les conditions standard.) Un orifice est un disque de petit diamètre intérieur et d'un diamètre extérieur qui correspond au diamètre du tuyau dans lequel il est inséré. Ce dispositif simple génère des turbulences. La perte de charge qui en résulte est une fonction connue du diamètre intérieur et du débit

$$HL = 0.62^4 \frac{f^2}{d^4},$$

où f est le débit et d le diamètre intérieur. Le tableau ci-dessous indique les pertes de charge pour différents diamètres et deux débits.

Orifice diameter in m	0.0031	0.0033	0.0037	0.0041	0.0044	0.0046	0.005	0.0056
Flow in l/s	0.12							
Head loss in m	23.0	17.9	11.4	7.5	5.7	4.8	3.4	2.2
Flow in l/s	0.2							
Head loss in m	64.0	49.8	31.5	20.9	15.8	13.2	9.5	6.0
Head losses induced by orifices for 2 different flows								

Un orifice de diamètre intérieur de 4 mm peut absorber 7 mètres de surpression pour un débit de 0,12 l/s.

Traitement des demandes individuelles

La principale différence entre l'approche probabiliste de NeatWork et l'analyse conventionnelle basée sur des moyennes déterministes réside dans les hypothèses faites sur le comportement des utilisateurs aux robinets. Il convient d'y accorder une attention particulière dans notre discussion.

Critique de l'approche déterministe

Dans l'exemple de la Banque mondiale, un robinet est censé débiter 173 litres pendant l'heure de pointe à un taux constant de 0,048 l/s. Pour ce débit, le robinet reste ouvert sans interruption pendant toute l'heure. Ce débit constant permet de remplir un récipient de 12 litres en un peu plus de 4 minutes. Cette durée est considérée prohibitive par APLV. Et ce, pour deux raisons. Premièrement, les utilisateurs risquent d'être découragés par la longueur du temps de remplissage. La seconde raison, encore plus convaincante, est le temps d'attente devant le robinet qui, selon la théorie mathématique des files d'attente, risque d'être très long. Cela est dû au fait que, dans une file d'attente avec des arrivées et des temps de service aléatoires, le temps d'attente prévu augmente sans limite à mesure que l'intensité du trafic, mesurée par le taux d'utilisation du robinet, se rapproche de 100 %. La communauté ne l'accepterait pas.

Le réalisme suggère qu'il faut assurer débit supérieur à 0,048 l/s. La norme de l'APLV est de 0,12 l/s, ce qui permet de remplir un récipient de 12 litres en 1 minute et 40 secondes. Si le réseau est capable de fournir de l'eau à un débit stable de 0,12 l/s, les utilisateurs passeront moins de temps au robinet. En période de pointe, le robinet ne sera actif que $0,048 / 0,12 = 40\%$ du temps, au lieu de 100%. La demande sera intermittente, alternant des phases d'arrêt et de marche sur une base stochastique. Pendant la période de base, le taux d'occupation tombe à 16% et pendant la période basse à seulement 3,2%. Notez que le taux d'occupation serait encore plus faible s'il n'y avait qu'un seul ménage par robinet, comme c'est le cas pour presque tous les projets APLV.

Approche probabiliste

Du point de vue d'un robinet individuel, le schéma déterministe n'est pas une approximation acceptable de la demande réelle. Dans le cas d'Esperenza, la loi des grands nombres est implicitement invoquée pour remplacer les demandes stochastiques aux nœuds de jonction par une demande déterministe. Le très petit nombre de robinets en J2, (3), voire en J6, (6),

ne permet pas vraiment l'approximation déterministe. Si nous gardons à l'esprit que NeatWork est surtout utilisé pour les réseaux avec des robinets individuels dans chaque ménage, l'hypothèse déterministe est encore moins acceptable. En effet, chaque robinet public dessert 5 ménages dans l'exemple de WB. Pour un cas avec un seul ménage par robinet, la demande totale pendant l'heure de pointe tombe à $173 / 5 = 34,6$ l. Au débit de $0,12$ l/s, le temps d'occupation serait de $34,5 / (0,12 * 3600) = 8\%$ de l'heure de pointe.

NeatWork propose le modèle probabiliste suivant pour représenter le comportement de l'utilisateur au niveau d'un robinet. L'utilisateur vient à des moments aléatoires et prélève des quantités d'eau qui sont des fractions de la quantité totale à prélever pendant une période donnée de la journée. Ce processus se matérialise par un état aléatoire d'arrêt ou de fonctionnement. L'hypothèse principale est que le temps d'occupation fractionnaire peut être interprété comme la probabilité que le processus soit dans une situation de marche lorsqu'il est observé à un moment aléatoire de la période. L'autre hypothèse est que tous les utilisateurs sont identiques - même besoin total par période et même probabilité d'ouvrir le robinet - mais indépendants en termes de probabilité. Selon ces deux hypothèses, on peut modéliser l'état arrêt ou marche de tous les robinets par la simple loi de Bernoulli.

Penchons-nous sur l'équation simple reliant le débit et le temps d'occupation. Si le débit du robinet f est constant pendant la période de longueur τ , la proportion de temps ρ pendant laquelle le robinet est ouvert satisfait à l'équation

$$f * \rho = D / \tau, \quad (1)$$

où D est la demande totale de l'utilisateur pendant la période. La proportion ρ est inversement proportionnelle à f . Si le débit change, l'utilisateur adaptera son temps d'occupation au robinet, de manière à respecter l'équation dont le membre de droite est fixe. En conséquence, si on observe des débits moyens très différents d'un robinet à l'autre, les temps d'occupation seront très différents. Selon notre hypothèse, les probabilités d'ouverture ne seront pas les mêmes d'un robinet à l'autre. Cela invalide la deuxième hypothèse selon laquelle la probabilité d'être en état de marche est la même pour tous les robinets. Une simulation Monte-Carlo basée sur une probabilité constante et identique pour tous les robinets ne fera sens que si les débits observés sont les mêmes à tous les robinets. C'est un élément à prendre en compte lors de l'interprétation des résultats d'une simulation.

Les deux modules de NeatWork

NeatWork comprend de deux modules indépendants. Le module de conception, dit de design, sélectionne les équipements les moins coûteux, tuyaux et orifices, permettant d'assurer un débit souhaité à chacun des robinets. Ce module ne s'applique qu'à des réseaux arborescents, donc sans boucle. Comme le réseau fonctionne sous un régime de demandes stochastiques intermittentes, le module de design ne peut pas garantir une valeur déterminée pour les débits. Pour anticiper les aléas, le module intègre un concept de qualité de service, qui est en fait une probabilité ; il s'applique à chaque branche du réseau et exige que le tuyau choisi soit d'un diamètre suffisant pour servir les demandes intermittentes en aval. La probabilité qu'il en soit ainsi est précisément la qualité de service. La relation entre la qualité de service et le débit à chaque robinet ne peut être exprimée par une formule mathématique exacte. NeatWork a recours à une approximation heuristique. C'est pourquoi le produit du module de conception doit être soumis à un test de simulation. Si les résultats

sur la variabilité des débits aux robinets sont jugés insatisfaisants, le module de conception doit être réactivé avec des paramètres plus exigeants.

Module de simulation

Le module comporte deux composants : un générateur de Monte-Carlo de l'état "arrêt ou marche" pour chaque robinet ; et un moteur de calcul⁵ pour déterminer les débits dans chaque scénario de l'échantillon de Monte-Carlo. Outre la taille de l'échantillon, le principal paramètre est *OF*, la fraction de robinets ouverts. La simulation la plus importante est réalisée pour la valeur de *OF* associée à la période de demande de pointe.

Il convient de mentionner au passage que le module peut simuler des réseaux avec des boucles, à condition que les tuyaux et les orifices soient déterminés par ailleurs. Nous illustrerons cette fonctionnalité annexe sur le réseau *Esperenza* dans lequel nous aurons introduit deux arcs supplémentaires, créant ainsi 3 boucles. Les résultats sont présentés en annexe, car ce point est un peu éloigné de l'objectif principal de la présente étude.

Module de conception

Le module de conception sélectionne des tuyaux et des orifices dans les bases de données de tuyaux et d'orifices pour construire la conception optimale. Les paramètres importants sont le débit cible *TF* et la fraction de robinets ouverts *OF*. Leur valeur doit être définie par l'utilisateur. Plus haut dans cet article, nous avons donné des arguments pour aider à choisir des valeurs adéquates basées d'une part sur le temps d'attente admissible pour remplir un récipient d'eau et d'autre part sur l'allocation quotidienne d'eau et le facteur multiplicatif pour la demande de pointe. Les designs sont conçus pour répondre aux demandes futures (5 à 10 ans) pendant la période de pointe. À la date de mise en service et en période creuse, la demande devrait être inférieure à la future demande de pointe. Afin de répondre à la nouvelle demande, les utilisateurs sont censés adapter leur comportement. Selon l'équation (1), ils modifieront leur temps d'occupation ρ . Ce phénomène sera pris en compte par des simulations avec un facteur *OF* différent.

Mentionnons que le module de design peut prendre en compte des contraintes externes sur le choix des tuyaux et des orifices, voire imposer des équipements spécifiques sur des liaisons données. Cette fonctionnalité permet de compléter le design donné du réseau principal par une sélection optimale des tuyaux et orifices dans les sous-réseaux. Nous avons utilisé cette fonctionnalité pour le cas *Esperenza*.

Quelques autres paramètres sont utilisés dans le module pour générer un design. Le plus important est ce que l'on appelle la qualité de service *SQ*, qui détermine le débit nécessaire dans toute branche pour atteindre le débit cible *TF* dans tous les robinets ouverts en aval de ce lien. Comme le nombre de robinets ouverts est stochastique, *SQ* est un concept de probabilité. Il représente la proportion de temps pendant laquelle le débit estimé dans le maillon sera suffisant pour satisfaire les demandes stochastiques en aval. Dans les expériences, nous avons choisi $SQ = 0,65$, tout au long. On peut utiliser des valeurs plus

⁵ Les débits sont calculés comme étant la solution optimale d'un problème de minimisation de l'énergie. Le moteur sous-jacent est l'outil d'optimisation très efficace Mosek [5].

grandes qui conduiront à l'utilisation de plus gros tuyaux ; on espère que l'autorégulation sera meilleure.

Une façon alternative de corriger un design est de faire en sorte que la pression estimée en amont immédiat du robinet soit majorée. Pour compenser il faudra munir le robinet d'un orifice de diamètre plus petit, mais on diminue aussi l'indépendance des robinets entre eux. Pour mettre en œuvre cette contrainte on utilise un mécanisme interne de NeatWork qui assure que la ligne de gradient de pression reste supérieure à la pression atmosphérique tout au long du chemin du réservoir à un robinet. L'astuce consiste donc à élever artificiellement l'élévation des nœuds qui sont les prédécesseurs immédiats des robinets. Cela aura un effet sur le design, mais pas sur les simulations.

Pour expliquer la procédure nous introduisons un nouveau paramètre appelé facteur de sécurité. Plus il est grand, plus l'élévation alternative attribuée aux nœuds qui sont les prédécesseurs immédiats des nœuds de robinets sera élevée. La modification est dictée par la règle simple suivante. Soit HT et HF les niveaux d'eau au réservoir et l'élévation au niveau d'un robinet, respectivement. La hauteur minimale à assigner au nœud prédécesseur immédiat est

$$HP = HF + (HT - HF) * (1 - 1 / SF) = HF * 1 / SF + HT * (1 - 1 / SF),$$

où SF est le facteur de sécurité. Plus ce facteur est grand, plus la hauteur minimale est élevée. (Voir l'annexe pour plus d'informations).

La nouvelle élévation peut être insérée à la main, mais avec un risque d'erreur possible sur les grands réseaux. Pour compenser cette absence temporaire dans NeatWork, une macro Excel fait le travail sur une feuille de calcul. Elle tire parti de la facilité avec laquelle on peut coller et copier des données de NeatWork et d'Excel vers Excel et NeatWork.

Enfin, nous soulignons l'importance des orifices dans l'ensemble du processus. Compte tenu de l'absence de régulation externe par des pompes, des vannes et tout dispositif actionné par l'homme, NeatWork prévoit une autorégulation des débits par les seules pertes de pression dues au frottement dans les tuyaux et à la turbulence dans les orifices et les robinets. Les orifices sont de simples artifices destinés à renforcer les pertes de charge à l'extrémité du réseau. Leur impact quantitatif a été décrit plus haut dans ce rapport. Si l'on veut tester les performances d'un réseau existant grâce au module de simulation, il faut soit décider des orifices par un calcul externe et introduire les valeurs à la main, soit utiliser le module de conception pour suggérer des orifices adéquats.

Résultats numériques

Pour les lecteurs qui sont habitués à l'approche déterministe, nous reprenons d'abord l'exemple de *Esperenza* avec les tuyaux préconisés dans [6]. Afin d'imiter le cas déterministe, nous imposons que tous les robinets soient simultanément ouverts ou, de manière équivalente, que le paramètre "fraction de robinets ouverts" soit fixé à 1. Un débit cible de 0,048 l/s pour chaque robinet assure que le quota d'eau pour l'heure de pointe sera satisfait.

Approche déterministe

Au mépris du réalisme, nous attribuons à chaque branche des sous-réseaux une longueur arbitraire de 0,5 m. Nous les équipons de tuyaux de 5 cm, les plus petits parmi les trois tuyaux commerciaux utilisés dans l'exemple. On affecte à l'amont de chaque robinet un orifice qui compensera l'excès de pression prévu au niveau du nœud de jonction. Cette opération sera prise en charge par le module de design de NeatWork, en imposant que tous les robinets soient ouverts simultanément, $OF = 1$, et en attribuant un débit cible $TF = 0,048$ l/s. Le débit cible étant le même pour chaque robinet, il est facile de vérifier que $47 * 0,048$ est exactement le débit souhaité à la sortie du réservoir pour répondre à la demande totale. Une fois que les orifices ont été attribués, NeatWork peut simuler le comportement du réseau lorsque tous les robinets sont ouverts.

Nous affichons ci-dessous les résultats de la simulation pour l'heure de pointe.

Pressure loss in pipes down to junction point				Speeds and flows in pipes					
ID	Elev.	Excess	Loss	Begin	End	Length	Diam	speed	flow
T1	20.8		0	T1	J4	30	0.100	0.29	2.278
J2	10	10.61	0.15	J3	J2	200	0.050	0.07	0.137
J3	11	9.65	0.11	J4	J3	300	0.075	0.11	0.486
J4	13	7.73	0.03	J4	J5	250	0.075	0.22	0.972
J5	14	6.5	0.26	J4	J6	200	0.075	0.07	0.309
J6	12	8.71	0.05	J5	J7	250	0.050	0.17	0.334
J7	13	7.26	0.5						

Les diamètres des tuyaux sont ceux proposés dans le manuel [6]

Coût du réseau principal : 447 120

Pression aux nœuds, débit et vitesse dans les conduites pendant la période de pointe.

Paramètres de conception de NeatWork : $OF = 1$ et $TF = 0.048$ l/s.

Le manuel [6] recommande une surpression d'au moins 7 mètres aux nœuds de jonction. Le design proposé répond à cette exigence, sauf au nœud J5. Il convient de noter que la différence entre le niveau de l'eau dans le réservoir (20,76 m) et l'élévation du nœud (14 m) rend impossible la réalisation de l'objectif de 7 mètres. Des études similaires pourraient être réalisées pour d'autres périodes de la journée, lorsque la demande moyenne est plus faible, mais ce n'est pas le sujet du présent article.

Approche probabiliste

Dans cette section, nous passons en revue trois scénarios. Les scénarios 1 à 3 donnent une liberté croissante à NeatWork pour générer un design, allant d'une réplique aussi proche que possible du design Esperenza original, à un design à moindre coût basé sur un accès complet à la base de données des tuyaux. Les paramètres de conception de NeatWork sont définis de manière à anticiper des débits satisfaisants pendant la période de pointe. La conformité du réseau est vérifiée par des simulations de Monte-Carlo. Les résultats des simulations à examiner sont : *i*) les débits des robinets individuels, leurs valeurs minimales, moyennes et maximales et *ii*) la variation des débits moyens individuels dans tous les robinets. La valeur cible est $TF = 0,12$ l/s.

La pertinence du schéma de Monte-Carlo est garantie lorsque le critère (ii) est rempli, car ce critère soutient l'hypothèse d'une probabilité égale d'ouverture du robinet pour chaque

utilisateur. Une variation de 10% autour de la moyenne pour 95% des robinets semble acceptable. Le critère (i) est moins strict, mais des valeurs épisodiques basses pour le débit peuvent ne pas être acceptables pour certains utilisateurs. Jusqu'à présent, la recommandation de l'APLV a été de garantir 0,06 l/s, moitié de la valeur cible de 0,12 l/s, dans au moins 95 % des cas. Les informations sur les pressions et les vitesses aident à évaluer le mérite du design. Selon les calculs faciles effectués auparavant, le temps d'occupation devrait être de 40 %. Le paramètre OF est fixé à 0,4, dans les modules de design et de simulation.

Une fois qu'un design répond aux critères d'acceptabilité pendant la période de pointe, d'autres simulations sont effectuées pour analyser le comportement à d'autres moments de la journée. Dans ce document, nous considérons deux périodes supplémentaires : la période de base où la demande moyenne sur la période est la même que la moyenne de la journée divisée par 24, ce qui est également 2,5 de moins que la demande de pointe ; et la période basse où la demande est 0,2 fois la demande de base. Pour satisfaire l'équation (1) en toute période, les facteurs *OF* et *TF* doivent changer. Supposons d'abord qu'en toute période le débit moyen reste proche de la valeur cible $TF = 0,12$. Seul le temps d'occupation variera : il sera égal $0,4 / 2,5 = 0,16$ pendant la période de base et $0,16 * 0,2 = 0,032$ pendant la période creuse.

Period	Peak	Base	Low
Demand in liters	173	69	14
Ratio to average/day	2.5	1.0	0.2
Target flow <i>TF</i> in l/s	0.12	0.12	0.12
Fraction of open faucets <i>OF</i>	0.400	0.160	0.032

Demandes par période et fraction correspondante *OF* de robinets ouverts pour un débit cible uniforme $TF = 0,12$ l/s.

En pratique il peut se faire que la réduction drastique du nombre de robinets ouverts simultanément induise une diminution du total des écoulements et donc une réduction significative des pertes de charge dans le réseau principal. Il en résulte une augmentation de la pression aux nœuds précédant les robinets qui entraîne pour finir un débit plus élevé aux robinets. Il se peut donc qu'en simulant la période creuse avec $OF = 0,032$ le débit moyen observé soit plus élevé que la valeur attendue 0,12. S'il est par exemple égal à 0,14, le prélèvement d'eau pendant l'heure serait de $0,14 * 0,032 * 3600 = 16,2$ litres, une valeur supérieure à l'objectif de 13,8 litres. Pour atteindre la valeur de 13,8, on peut effectuer de nouvelles simulations avec des valeurs *OF* plus basses, jusqu'à obtenir par essais et erreurs la cible $OF * TF = 13,8$. Ce raffinement n'est pas très important. Nous le mentionnons pour expliquer pourquoi les valeurs des *OF* peuvent différer des valeurs théoriques dans certains tableaux présentant les résultats de la simulation.

Nous pouvons maintenant dégager les trois scénarios que nous avons explorés. Dans chacun d'entre eux, le module de design de NeatWork permet de spécifier quel tuyau installer sur chacune des branches et quel orifice positionner en amont de chaque robinet. Le premier scénario revisite le cas déterministe étudié précédemment mais du point de vue du modèle probabiliste. Le second scénario donne à NeatWork la liberté de sélectionner n'importe quelle conduite dans les conduites commerciales de classe A. De manière surprenante, NeatWork sélectionne uniformément la conduite D la moins chère. Pourtant, le design est

presque aussi performant que dans le premier scénario. Le coût du matériau est inférieur d'environ 25 %. Dans le dernier scénario, NeatWork peut choisir les tuyaux dans la base de données étendue incluant les tuyaux de A à H. NeatWork utilise principalement les tuyaux A à C de la section « Tuyaux supplémentaires ». Les performances sont légèrement dégradées, mais les coûts sont réduits de près de 60%.

Scénario 1. Réseau d'origine

Les résultats de la simulation sont affichés sur deux tableaux contigus. Le premier fait notable est la stabilité absolue des débits malgré les demandes intermittentes. Chaque robinet reçoit le même débit moyen (pas de variabilité entre les robinets). De plus, chaque fois qu'un utilisateur ouvre son robinet, l'eau se déverse à un débit presque constant de 0,12 l/s (aucune variabilité intra-robinet). Il en est exactement ainsi pour la période de pointe et presque exactement ainsi pour les deux autres périodes. Par conséquent, le temps d'occupation de chacun des robinets est bien le même pour tous et égal à la probabilité qui a servi à créer l'échantillon de simulation. Cette stabilité établit que le service rendu aux utilisateurs est impeccable.

En ce qui concerne les pressions aux nœuds, l'approche probabiliste donne des valeurs moyennes qui sont presque identiques à celles obtenues par l'approche déterministe.

Statistics on flows				Statistics on pressures							
	Peak	Base	Low	Average pressures at junction node Pressure losses in main							
Fraction of open faucets	0.4	0.16	0.032	ID	Elevat.al	Peak	Base	Low	Peak	Base	Low
Analysis between faucets				Tank	20.76						
<i>Distribution of the average flows</i>				J2	10 7	10.6	10.73	10.8	0.14	0.03	0
Min of average flows	0.120	0.120	0.120	J3	11 7	9.67	9.74	9.76	0.09	0.02	0
Mean of average flows	0.120	0.121	0.121	J4	13 7	7.76	7.76	7.76	0	0	0
Max of average flows	0.120	0.123	0.124	J5	14 7	6.52	6.71	6.75	0.24	0.05	0.01
Variability of average flows	0.07%	0.92%	1.27%	J6	12 7	8.73	8.75	8.76	0.03	0.01	0
<i>Confidence level on variation among faucets</i>				J7	13 7	7.26	7.64	7.75	0.5	0.12	0.01
Select Range bounds (in %)	1%	1%	2%								
Lower bound	0.120	0.120	0.120								
Upper bound	0.120	0.123	0.124								
Level of Confidence	100%	100%	100%								
Analysis within faucets											
Min variability	0.01%	0.00%	0.00%								
Mean variability	0.61%	0.32%	0.09%								
Max variability	1.96%	1.17%	0.39%								
Water withdrawal during the period											
Total	172.78	69.73	13.99								
Ratio to average	2.50	1.01	0.20								

Débits et pressions pour le design original du réseau principal.
 Paramètres de conception de NeatWork : $OF = 0,4$ and $TF = 0,12$ l/s
 Coût du réseau principal : 447.120

Scénario 2. Réseau à moindre coût avec des conduites D à H

Dans cette deuxième expérience, nous utilisons le module de design pour générer une conception à moindre coût avec des tuyaux de classe 100, c'est-à-dire des tuyaux dont le diamètre intérieur est d'au moins 5 cm. Étonnamment, NeatWork installe partout des tuyaux de 5 cm de diamètre, au risque de provoquer une instabilité de l'écoulement et un

mauvais service à l'utilisateur. De fait, ce n'est pas du tout le cas. En période de pointe, la variabilité du débit moyen prise entre les robinets est si faible que l'hypothèse de probabilité commune à chaque utilisateur est validée, ce qui garantit la fiabilité des résultats de la simulation. La variabilité intra-robinet est un peu plus importante, mais reste très faible. Pour la période de base et la période creuse, nous avons adapté le facteur *OF* (0,14 au lieu de 0,16 et 0,027 au lieu de 0,032) pour que le produit *OF * TF* soit bien égal au prélèvement d'eau prévu pour la période. Nous observons en effet que les débits moyens deviennent plus importants que l'objectif de 0,12 l/s mais la quantité d'eau prélevée est bien celle de la période.

Sans surprise, la pression aux nœuds de jonction diminue. L'utilisation uniforme du plus petit tuyau de la gamme D-H entraîne une augmentation des pertes de pression dans les tuyaux. Le fait remarquable est que des pressions nettement plus faibles que celles recommandées dans le manuel [6] suffisent à garantir un service quasi parfait aux utilisateurs. La réduction des coûts est de 25 %.

Statistics on flows				Statistics on pressures							
	Peak	Base	Low	Average pressures at junction nodes			Pressure losses in main				
Fraction of open faucets	0.4	0.14	0.027	ID	Elevat.	Peak	Base	Low	Peak	Base	Low
Analysis between faucets				Tank 20.76							
<i>Distribution of the average flows</i>				J2	10	9.47	10.55	10.75	1.29	0.21	0.01
Min of average flows	0.120	0.126	0.128	J3	11	8.28	9.38	9.72	1.48	0.38	0.04
Mean of average flows	0.121	0.136	0.140	J4	13	6.88	7.54	7.75	0.88	0.22	0.01
Max of average flows	0.122	0.148	0.156	J5	14	4.25	6.04	6.69	2.51	0.72	0.07
Variability of average flows	0.62%	7.28%	9.20%	J6	12	7.74	8.56	8.75	1.02	0.20	0.01
<i>Confidence level on variation among faucets</i>				J7	13	5.02	7.08	7.71	2.74	0.68	0.05
Select Range bounds (in %)	1%	10%	10%								
Lower bound	0.120	0.126	0.128								
Upper bound	0.122	0.148	0.154								
Level of Confidence	96%	100%	72%								
Analysis within faucets											
Min variability	1.54%	0.72%	0.14%								
Mean variability	4.65%	2.25%	0.69%								
Max variability	8.27%	4.03%	1.51%								
Water withdrawal during the period											
Total	173.99	68.36	13.61								
Ratio to average	2.52	0.99	0.20								

Débits et pressions pour le design à moindre coût avec libre choix parmi tous les tuyaux de la classe A (ID : D à H). La solution optimale utilise uniquement le tuyau D.
 Paramètres de conception de NeatWork : *OF* = 0,4 and *TF* = 0,12 l/s
 Coût du réseau principal : 340 710

Scénario 3. Réseau à moindre coût avec des tuyaux A à H

Dans cette dernière expérience, nous avons laissé NeatWork concevoir le système avec un libre choix parmi tous les tuyaux disponibles. Lors d'un premier essai, NeatWork a produit un réseau à très faible coût, mais la simulation a révélé une trop grande variabilité. Nous avons alors eu recours au dispositif d'augmentation de l'élévation, avec un coefficient de sécurité *SF* = 1,5. Par exemple, l'élévation du nœud J2 devient,

$$10 * 1/1.5 + 20.76 * (1 - 1/1.5) = 13.6 \text{ m.}$$

Les trois robinets rattachés à J2 conservent leur élévation initiale de 10 m. La solution est présentée ci-dessous. Notez que la moitié des segments combinent deux types de tuyaux différents ce qui permet un ajustement plus fin. L'utilisateur peut toutefois imposer que

NeatWork n'installe qu'un seul type de tuyau sur un segment. Notez que le coût total du réseau principal chute à 190 848, soit une réduction de 57% du réseau d'origine.

Scenario 3. Least cost design with A to H pipes						
Begin	End	Length	Length 1	Diam1	Length 2	Diam 2
T1	J4	30	30	0.075	0	0
J3	J2	200	150	0.032	50	0.025
J4	J3	300	300	0.032	0	0
J4	J5	250	244	0.05	6	0.032
J4	J6	200	2	0.032	198	0.025
J5	J7	250	250	0.032	0	0

Tuyaux sélectionnés dans la solution à moindre coût à partir de l'ensemble des tuyaux de classe A (D à H) et les tuyaux A à C.

Le fractionnement des segments en deux sous-segments est autorisé à des fins d'ajustement.

Paramètres de conception de NeatWork : $OF = 0,4$ and $TF = 0,12$ l/s

Coût du réseau principal : 190 846

Statistics on flows			
	Peak	Base	Low
Fraction of open faucets	0.4	0.14	0.025
Analysis between faucets			
<i>Distribution of the average flows</i>			
Min of average flows	0.120	0.121	0.121
Mean of average flows	0.122	0.148	0.159
Max of average flows	0.125	0.172	0.190
Variability of average flows	1.16%	12.59%	16.69%
<i>Confidence level on variation among faucets</i>			
Select Range bounds (in %)	3%	15%	15%
Lower bound	0.120	0.126	0.135
Upper bound	0.125	0.170	0.183
Level of Confidence	100%	68%	47%
Analysis within faucets			
Min variability	0.19%	0.11%	0.02%
Mean variability	11.62%	7.32%	3.19%
Max variability	23.15%	16.28%	8.82%
Water withdrawal during the period			
Total	175.47	74.50	14.31
Ratio to average	2.54	1.08	0.21

Statistics on pressures							
Average press. at junction nodes				Pressure losses in main			
ID	Elevat.	Peak	Base	Low	Peak	Base	Low
Tank	20.76						
J2	10	5.70	9.45	10.61	5.06	1.31	0.15
J3	11	4.64	8.11	9.51	5.12	1.65	0.25
J4	13	7.63	7.73	7.76	0.13	0.03	0.00
J5	14	4.70	6.24	6.70	2.06	0.52	0.06
J6	12	4.15	7.10	8.48	4.61	1.66	0.28
J7	13	3.47	6.52	7.56	4.29	1.24	0.20

Débits et pressions pour la solution à moindre coût à partir des tuyaux de classe A (D à H) et les tuyaux A à C.

Paramètres de conception de NeatWork : $OF = 0,4$ and $TF = 0,12$ l/s. Coût du réseau principal : 190 846

Synthèse des comparaisons entre les 3 scénarios

L'approche probabiliste nous a permis de générer et d'analyser 3 scénarios que nous pouvons comparer sur base de deux critères, d'une part le coût des tuyaux à installer et d'autre part le service rendu aux utilisateurs. Le scénario 1 correspond à l'installation préconisée dans le manuel [6]. NeatWork génère les scénarios 2 et 3 par minimisation des coûts sur la base d'une gamme plus ou moins étendue de tuyaux commerciaux.

L'objectif de minimiser le coût total des matériaux est atteint. Le tableau ci-dessous présente les coûts des tuyaux dans le réseau principal et dans les sous-réseaux.

Material cost of pipes			
Scenario	1	2	3
Main network	447120	340710	190846
Subnetworks	119941	119941	36805
Total	567061	460651	227651

Coûts du réseau principal et des sous-réseaux.

Le coût des sous-réseaux est indiqué dans un souci d'exhaustivité. Pour les sous-réseaux, NeatWork sélectionne les tuyaux les moins chers dans la liste autorisée : tuyau D (diamètre de 5 cm) pour les scénarios 1 et 2 ; tuyau A (diamètre 2) pour le scénario 3.

Le deuxième critère est pertinent dès que l'on admet que peu de robinets sont ouverts simultanément et qu'il n'est pas possible de savoir lesquels le sont. Ce phénomène stochastique est une conséquence directe de ce que le temps de prélèvement de l'eau aux robinets n'est qu'une fraction du temps total disponible et que la présence d'utilisateur à chaque robinet n'est pas un processus déterministe. Il en résulte de possibles variations de débit aux robinets qui peuvent s'avérer inacceptables pour les usagers. Seul un modèle probabiliste peut estimer cette instabilité. Sur la base de cette approche, nous avons établi qu'une réduction de 57% du coût peut être obtenue au prix d'un accroissement très modeste de la variabilité des débits. Le débit entre robinets varie très peu en période de pointe, ce qui soutient l'hypothèse d'un service égal pour tous les utilisateurs. L'économie de coûts est réalisée grâce à l'utilisation de tuyaux de plus petit diamètre. Elle entraîne plus de friction, et donc plus de perte de charge dans le réseau principal. Les pressions aux nœuds de jonction diminuent de façon monotone à mesure que le coût du scénario diminue. De même, la perte de charge augmente. Dans chaque scénario, les pressions augmentent de façon monotone (la perte de charge diminue) lorsque la demande diminue au cours de la période.

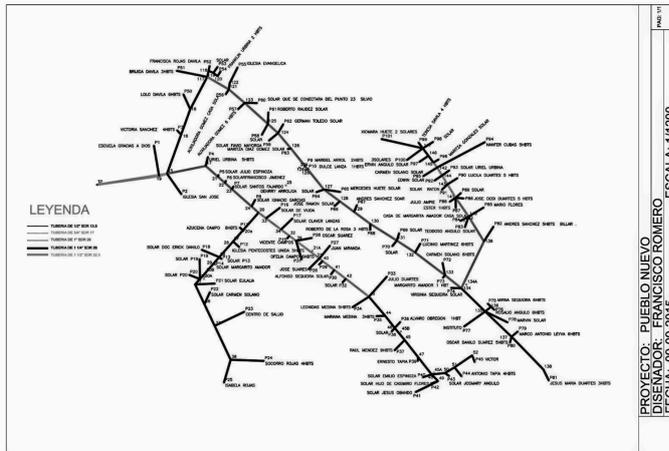
Faute de pouvoir mesurer statistiquement le service rendu aux utilisateurs comme le fait NeatWork, la pratique la plus courante, dont se fait écho le manuel [6], est d'imposer, par une règle empirique, une pression résiduelle conséquente à tous les nœuds de jonction. Cette règle, sans fondement théorique solide, pousse à choisir une même valeur élevée pour la pression résiduelle en chaque nœud de jonction. Dans le cas de *Esperanza*, les 7 mètres de pression requis sont excessifs puisqu'en ayant recours aux 3 mêmes tuyaux commerciaux du scénario 1 original, NeatWork propose la réalisation alternative du scénario 2 qui assure une qualité de service presque identique mais une réduction de coût de 23%.

L'approche traditionnelle ignore le comportement aléatoire des usagers. Elle ne permet pas de quantifier la qualité du service rendu aux usagers et de réaliser un arbitrage entre ce service et le coût de l'installation.

Un exemple de projet APLV

Au terme de cette étude, il nous paraît intéressant de donner un bref aperçu sur un projet de APLV réalisé pour la communauté de Pueblo Nuevo, Paiwas, Nicaragua. Le plan en 2D du réseau révèle la dispersion des habitations typique de la région. L'identification d'une

structure hiérarchique servant de support à une modélisation déterministe n'est visiblement pas possible.



Le projet implique 47 familles et 7 institutions (1 école primaire, 1 école secondaire, 3 églises, 1 centre de santé, 1 bâtiment municipal), pour un total de 228 personnes. Le système d'écoulement gravitaire de l'eau a été conçu pour avoir une durée de vie utile d'au moins 20 ans. La croissance démographique prévue de la municipalité a été prise en considération afin de garantir que la demande en eau sera satisfaite à long

terme. Ce système est conçu pour fournir de l'eau 24 heures sur 24, 7 jours sur 7, avec une moyenne de 70 litres par jour et par personne, pour un total de 412 personnes. La demande quotidienne est uniformément répartie entre les 52 robinets ; elle s'élève à 555 litres à chaque robinet. La longueur totale du projet est de 2034 m pour une portée d'élévation maximale de 34 m.

Pendant la période de pointe, la demande par seconde est de $(555/24) * 2,5 / 3600 = 0,016$ l/s. Avec $TF = 0,12$, la valeur recommandée pour OF dans la conception pour la période de pointe à l'avenir est de 0,13. Avec le paramètre $SQ = 0,65$, NeatWork produit un modèle présentant une variabilité inter robinets acceptable, mais une variabilité intra robinet excessive. En certains robinets, les débits observés sont inférieurs 0,06 l/s un trop grand nombre de fois. Un nouveau modèle avec $SF = 1,4$ donne un modèle avec une variation presque nulle du débit moyen AvF entre les robinets et pour chaque robinet des variations de débit limitées. Ces résultats sont obtenus en quelques minutes une fois que les coordonnées spatiales du réseau ont été mises en forme, par exemple à l'aide d'un tableur.

Conclusion

NeatWork est un outil de conception et d'analyse des systèmes de distribution d'eau présentant les caractéristiques et exigences suivantes : *i)* la conception et l'analyse doivent porter sur l'ensemble du système, de la source aux utilisateurs finaux; *ii)* le coût de l'équipement des tuyaux est un point important; *iii)* les débits des robinets sont régulés par des équipements fixes (tuyaux et orifices) ; l'ouverture et la fermeture des robinets sont les seuls dispositifs actionnés par l'homme; *iv)* la gravité est la seule source d'énergie. La gestion des robinets par les utilisateurs finaux est inévitablement un processus stochastique intermittent. Les modèles déterministes basés sur une segmentation hiérarchique du réseau ne sont pas adaptés à la synthèse et à l'analyse de tels systèmes. NeatWork est conçu pour relever ce défi. Son module de conception se concentre sur deux objectifs opposés : s'efforcer de fournir de l'eau avec approximativement le même débit stable pour chaque utilisateur ; minimiser le coût total du matériau des tuyaux. Son module de simulation est l'outil indispensable pour accepter ou rejeter les designs.

Le modèle inclusif et probabiliste de NeatWork contraste avec l'approche habituelle dans la littérature sur les systèmes de distribution d'eau. Les études et méthodes concernent uniquement le niveau supérieur de la représentation hiérarchique du réseau ; elles utilisent un modèle déterministe pour la conception et l'analyse du système. Pour opposer les deux modèles, probabiliste et déterministe, nous utilisons une étude de cas décrite dans un manuel de la Banque mondiale. Le niveau supérieur, le réseau principal, est documenté, mais les seules informations sur les sous-réseaux qui se connectent au réseau principal sont le nombre de robinets publics et l'estimation de la demande quotidienne en eau par robinet. Afin de reproduire le modèle au format NeatWork, nous avons données des caractéristiques arbitraires au sous-réseau : une disposition en étoile et des longueurs pour chaque branche.

Dans une première expérience, nous avons utilisé NeatWork pour imiter l'approche déterministe. Nous obtenons des résultats similaires à ceux qui figurent dans le manuel [6]. Dans l'expérience suivante, nous avons utilisé la modélisation probabiliste de NeatWork pour étudier le comportement du réseau sous l'hypothèse de la demande intermittente. Les simulations de Monte-Carlo donnent des résultats entièrement compatibles avec l'approche déterministe. La raison en est que le réseau principal est tellement surdimensionné que les pertes de friction dans le réseau principal sont presque négligeables par rapport aux pertes de friction dans les sous-réseaux, ce qui rend les flux de robinets statistiquement indépendants. Dans les deux dernières expériences, le module de conception sélectionne les tuyaux pour obtenir la conception la moins coûteuse. En fonction des tuyaux disponibles, le module de design permet de réaliser des réductions de coûts substantielles. La simulation de Monte-Carlo montre que la réduction drastique des coûts n'affecte pas le service aux utilisateurs finaux.

La modélisation des demandes stochastiques intermittentes n'est pas triviale. Pourtant, NeatWork est suffisamment convivial pour permettre aux "tecnicos" de construire rapidement des projets dès que les coordonnées spatiales du projet ont été retranscrites. Les "tecnicos" n'ont pas besoin d'avoir recours à la supervision d'un expert pour produire le projet, les commandes à effectuer et établir le budget. Le bilan des 20 dernières années sur plus de 50 projets montre qu'avec l'aide de NeatWork, les designs sont efficaces, robustes et répondent aux besoins des habitants. La présente étude démontre aussi que NeatWork peut s'avérer utile pour des projets comme *Esperanza*, semblable par la taille à ceux de APLV, mais différents dans leur configuration qui permet l'identification d'une structure hiérarchique.

Bibliographie

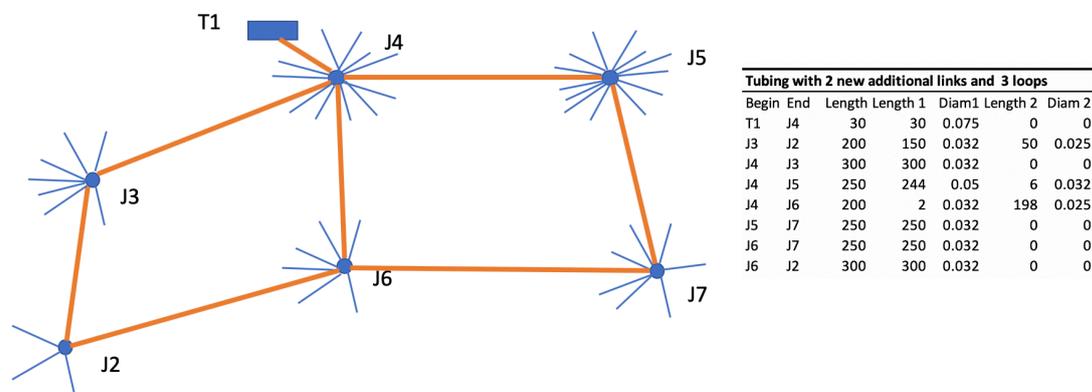
- [1] APLV, *Agua para la Vida*, Home page. <http://www.aplv.org>
World Bank. <http://documents.worldbank.org/curated/en/8086514468144565996/Design-manual>.
- [2] F. Babonneau, L. Drouet, G. Corcos, and J.-P. Vial, *NeatWork: Software and user guide*. APLV and Ordecys, 2002.

- [3] F. Babonneau, G. Corcos, L. Drouet, and J. P. Vial, "Neatwork: A tool for the design of gravity-driven water distribution systems for poor rural communities," *Informs Journal on Applied Analytics*, vol. 49, March-April 2019.
- [4] EPANET, "Software That Models the Hydraulic and Water Quality Behavior of [5] MOSEK ApS, "The MOSEK optimization toolbox for MATLAB manual. Version 9.0.", 2019, <http://docs.mosek.com/9.0/toolbox/index.html>.
- Water Distribution Piping Systems". <https://www.epa.gov/water-research/epanet>.
- [6] World Bank. 2012. Rural water supply: Design manual (English). Washington, DC:

Annexes

Réseau avec boucles

NeatWork offre la possibilité d'insérer de nouveaux liens dans un design dans lequel les tuyaux et les orifices sont déjà spécifiés. Ce faisant, l'utilisateur introduit nécessairement des boucles. Dans l'exemple original, nous avons ajouté deux arcs comme le montre le graphique ci-dessous. Les flux dans ce réseau étendu peuvent être calculés dans le module de simulation. Nous présentons les résultats concernant les débits, les vitesses et les pressions des robinets, sans élaborer davantage sur ce sujet qui, d'une manière ou d'une autre, met de côté l'objectif principal de cet article.



Le tableau ci-dessous présente des statistiques sur les débits des robinets et sur les pressions aux nœuds de jonction.

Statistics on flows			
Fraction of open faucets	Peak	Base	Low
	0.38	0.13	0.022
Analysis between faucets			
<i>Distribution of the average flows</i>			
Min of average flows	0.120	0.121	0.121
Mean of average flows	0.126	0.154	0.165
Max of average flows	0.144	0.184	0.200
Variability of average flows	5.95%	15.93%	19.59%
<i>Safety range analysis</i>			
Select Range bounds (in %)	10%	20%	20%
Lower bound	0.120	0.123	0.132
Upper bound	0.138	0.184	0.198
Level of Confidence	94%	77%	57%
Analysis within faucets			
Min variability	0.18%	0.11%	0.02%
Mean variability	8.22%	4.39%	1.47%
Max variability	16.43%	8.31%	2.98%
Water withdrawal during the period			
Total	172.13	72.20	13.07
Ratio to average	2.49	1.04	0.19

Statistics on pressures							
Average press. at junction nodes				Press. losses in main			
ID	Elevat.	Peak	Base	Low	Peak	Base	Low
Tank	20.76						
J2	10	5.72	9.28	10.6	5.04	1.48	0.15
J3	11	5.19	8.49	9.63	4.57	1.27	0.13
J4	13	7.63	7.73	7.76	0.13	0.03	0.00
J5	14	4.70	6.26	6.72	2.06	0.50	0.04
J6	12	3.98	7.36	8.62	4.78	1.40	0.14
J7	13	3.15	6.42	7.63	4.61	1.34	0.13

Même design que pour le scénario 3, avec deux nouveaux liens créant 3 boucles.
Coût supplémentaire de 66 750. Nouveau coût total 259 596.

Remarquez que nous avons dû imposer une plus petite fraction de robinets ouverts pour la période de pointe. Avec $OF = 0,4$, les débits sont supérieurs à la valeur cible $TF = 0,12$ l/s. Ce

n'est pas une surprise, car le réseau est le même que dans le scénario 3 (tuyaux et orifices), sauf que les deux nouveaux arcs ajoutent plus de possibilités d'écoulement dans le réseau. On note que la boucle semble augmenter la variabilité inter robinets de 1 % à 5 % et diminuer la variabilité intra robinets de 12 % à 8 %. Bien que la variation des chiffres soit faible, elle est logique. Les boucles offrent des possibilités supplémentaires pour que l'eau atteignent les robinets, et cela devrait contribuer à rendre les débits locaux plus stables. Toutefois, les orifices n'ont pas été modifiés pour s'adapter à la nouvelle situation. Malheureusement, NeatWork ne peut pas ajuster les orifices car le module de conception ne fonctionne que sur les réseaux en forme d'arbre. Les pressions sont presque les mêmes avec et sans boucles.

NeatWork fournit des informations sur les vitesses moyennes et l'orientation des écoulements pour chaque segment et sous-segment. À partir de ces informations, on peut calculer les débits moyens. Nous ne donnons pas ces chiffres, mais mentionnons simplement que dans les deux nouveaux arcs, il y a des débits moyens positifs dans les deux sens. Il n'y a pas de contradiction dans le fait que les valeurs moyennes combinent plusieurs configurations d'arrêt ou de marche. La conclusion correcte est que certaines configurations traduisent les demandes d'une section à l'autre, certaines entraînant des écoulements dans un sens, d'autres dans le sens inverse.

Recommandations pour réaliser un design avec NeatWork

Généralités

Le processus de conception et de simulation avec NeatWork comporte plusieurs étapes.

- I. Collecte des données d'entrée.
 - A. Disposition du système, nombre moyen d'habitants par robinet, consommation quotidienne d'eau par habitant, facteur de pointe. Mettre à jour la base de données des tuyaux.
 - B. Décider des objectifs. Sélectionner un débit cible, par exemple en considérant le temps nécessaire pour remplir un récipient de référence.
 - C. En considérant que le système est conçu pour correspondre aux conditions d'utilisation à la période de pointe pour l'horizon de planification, calculer la fraction de robinets ouverts via l'équation (1) : $OF = (\text{demande de robinets par seconde}) / TF$.
- II. Générer, tester et améliorer une conception.
 - A. Choisir une valeur pour la qualité de service SQ et générer un premier design. D'expérience, la valeur $SQ = 0,65$ génère des designs garantissant des débits moyens simulés AvF proches de la valeur cible TF .
 - B. Simuler la performance en utilisant le même facteur OF que dans le processus de design. Observer le débit moyen global AvF , la variabilité inter et intra robinets et voir si les résultats de la simulation sont satisfaisants. Si ce n'est pas le cas, il faut générer un nouveau modèle avec de nouvelles valeurs pour les paramètres de design. Nous suggérons deux approches différentes, qui peuvent éventuellement être combinées.
 1. Utiliser la technique qui augmente l'élévation du nœud précédant les nœuds des robinets, comme décrit dans le corps du document.
 2. Utiliser une qualité de service SQ plus élevée, par exemple 0,8 ou 0,95. La conception sera surdimensionnée. Il est certain que le débit moyen expérimental AvF dépassera la valeur cible TF . Afin de répondre aux données

d'entrée sur le taux de demande via l'équation (1), refaire un plan avec un faux débit cible $TF' < TF$, jusqu'à ce que le produit $AvF * OF$ atteigne le taux de demande recherché. Vérifier la variabilité. Si les chiffres montrent une variabilité excessive, essayez une valeur plus élevée pour SQ .

C. Simuler la performance en période creuse. Les périodes de faible demande sont susceptibles de donner lieu à des flux moyens AvF plus élevés. Ajuster le facteur de simulation OF , de manière à ce que le produit $AvF * OF$ corresponde au membre de droite de l'équation (1).

III. Opérations supplémentaires ; modifier les conduites dans une conception existante ; ajouter des liaisons supplémentaires qui induisent des boucles.

Outils Excel

NeatWork n'inclut pas certaines fonctionnalités que nous utilisons dans l'étude sur le cas *Esperanza*. En attendant que des informaticiens puissent aider à insérer ces fonctions dans le logiciel lui-même, nous avons développé des outils Excel pour faire ce travail. Le dialogue entre NeatWork et Excel est facilité par des opérations de copier-coller.

FlowAnalysis.xlsx est un simple traitement des débits fournis par NeatWork par simulation. Il utilise les informations sur les débits moyens aux différents robinets pour calculer des indicateurs sur la variabilité entre les robinets.

JP4.xlsx effectue un travail un peu plus complexe. Après avoir copié de NeatWork les données topographiques (nœuds et liens) et les avoir collées dans le fichier Excel, une macro traite les données pour relever l'altitude des nœuds qui sont les prédécesseurs immédiats des robinets. La valeur du rehaussement est une fraction de la différence entre l'élévation du réservoir et l'élévation réelle. Ce faisant, la ligne de pente le long du chemin entre le réservoir et le robinet est automatiquement rehaussée. La fraction en question est $(1 - 1/SF)$, où le choix du facteur de sécurité $SF \geq 1$ est laissé à l'utilisateur. Les nouvelles altitudes peuvent être recopiées dans NeatWork par copier-coller. Cette opération n'affecte que la phase de conception. Dans le calcul des écoulements par simulation, l'altitude des nœuds intermédiaires ne joue aucun rôle. Il n'est donc pas nécessaire de remettre les élévations à leur valeur initiale lors de la phase de simulation. Cependant, NeatWork signale des pressions excessives par rapport aux élévations modifiées. Les surpressions par rapport aux élévations réelles des robinets sont facilement obtenues par simple calcul arithmétique.

Recommandations de conception dans le manuel de la BM

Il est intéressant d'examiner les recommandations de conception du manuel [6] pour les mettre en rapport avec l'approche de NeatWork. Voici quelques extraits pp. 12.10 à 12.11

b. Steps in Distribution System Design Using Computer Software

6. Hydraulic Network Simulation:

This step is done by the computer software. If all the data required have been inputted by the designer, the software could proceed with its hydraulic run. The software computes the head losses (m) in each pipe, the rate of head loss (m/km) in each pipe, the flow velocities (m/s), and the pressure in each node (m).

The model is run for: (a) its peak-hour demand condition, to check for the possible value of the minimum systems pressure; and (b) its minimum demand condition, to check for the value of the possible maximum pressure in the network.

7. Examination of Hydraulic Run Results:

Usually all possible hydraulic parameters can be shown from the computer run results. Of these parameters, the designer must examine two important results very closely: (a) the low system pressure points that are below the 7 m pressure and the affected nodes, and (b) the pipes that have high head loss per km in excess of the 10 m/1,000 m pipeline criteria.

The designer must also examine the balancing flows of the reservoir and analyze if the reservoir discharge or inflow are reasonable for its storage size.

8. Adjusting Assumed Parameters of the Elements:

Based on the results of the computer simulation, the designer will improve the network model by adjusting the pipe and node data for specific elements, particularly for those that did not meet the design criteria. For example, for pipes that have high resulting head losses, the designer will have to increase the pipe size to the next larger diameter. If there is a system pressure that is below 7 m, the designer could replace some of the pipes leading to the affected node with a larger diameter. The height of the reservoir could be adjusted if needed to achieve a good system pressure.

The adjusted model is run again in the software. After the run, the results are examined and the model readjusted. The above cycle is done until an acceptable hydraulic model is achieved.

Summary on deterministic versus probabilistic approaches

	APLV approach	Standard approach
Scope and goal	<ul style="list-style-type: none"> Poor rural communities. Cannot afford sophisticated and costly equipment. Avoid need for maintenance. Major concern with the total cost of the pipes. 	<ul style="list-style-type: none"> Villages to medium-size communities. Include sophisticated equipment if needed
Network	<ul style="list-style-type: none"> From tank to end-users. Tree network. 	<ul style="list-style-type: none"> A two-level hierarchy of networks. Exclusive emphasis on the primary level. May include loops to secure public facilities (hospital, fire-station, ...)
Demand	<ul style="list-style-type: none"> Individuals in a household are endowed daily water consumption, the same for all. Households open faucets to withdraw their hourly quota at random. Faucets demands are essentially intermittent. 	<ul style="list-style-type: none"> Individuals in a household are endowed daily water consumption, the same for all. Household demands in a lower level distribution network are aggregated in a single deterministic demand at the connected node in the upper-level network
Data on equipment	<ul style="list-style-type: none"> Geographical data (pattern, elevations, distances) Technical specification and cost of available pipes. Characteristics of available orifices 	<ul style="list-style-type: none"> Geographical data (pattern, elevations, distances) Technical specification and cost of available pipes.
Data on demands	<ul style="list-style-type: none"> Daily users' demands Day pattern including peak factor. 	<ul style="list-style-type: none"> Daily users' demands Day pattern including peak factor.
Design	<ul style="list-style-type: none"> Meet the stochastic intermittent demands with a stable flow. Select least cost design that meets the demand. Prescribe fixed orifices to adjust flows 	<ul style="list-style-type: none"> Meet the deterministic demands at outlet nodes. Ensure sufficient pressure at outlets to allow for the desired water consumption. Include pumps, valves, and various pieces of equipment. Proceed by trial and errors to achieve a design meeting engineering rules of thumb (pressures, speeds, ...)
Simulation	<ul style="list-style-type: none"> For any configuration of user activity, compute faucet flows, pressures at nodes and speed in pipes. Perform Monte-Carlo sampling on configuration scenarios and compute flows for each scenario. Perform statistical analysis to check the adequacy of the design network 	<ul style="list-style-type: none"> Compute flows to meet the deterministic demand. Analyze performance. Compute performance at all day periods.
Additional features	<ul style="list-style-type: none"> NeatWork allows the inclusion of safety links in a design. Can simulate performance a network with loops. 	<ul style="list-style-type: none"> Analyze water quality Many others ... Several sophisticated algorithms exist that compute least cost designs for medium to large-size designs under the following constraints: meet deterministic average demands at delivery points with guaranteed pressures.