

# Réseau d'arrosage dimensionnement hydraulique

Motopompe diesel · Irrigation parcelle Durance

Version 7.0 | 2026-04-20 | Nourrice DN63 PN6 (Ø int. 55,4 mm, e = 3,8 mm). Suppression filtre sur tous les scénarios (filtre DN32 incompatible DN63 — hydrocyclone + filtre à sable envisagés). Recalcul complet.

## Table des matières

|                                                                                 |           |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Partie I — Contexte et objectifs</b>                                         | <b>2</b>  |
| <b>I.1 Contexte</b>                                                             | <b>3</b>  |
| I.1.1 La parcelle                                                               | 3         |
| I.1.2 Configuration du réseau — hypothèses communes                             | 3         |
| I.1.3 Scénarios étudiés                                                         | 3         |
| <b>I.2 Objectifs</b>                                                            | <b>4</b>  |
| <b>I.3 Équipements</b>                                                          | <b>4</b>  |
| I.3.1 Motopompe                                                                 | 4         |
| I.3.2 Filtre à tamis                                                            | 5         |
| I.3.3 Canalisations                                                             | 5         |
| I.3.4 Asperseurs                                                                | 6         |
| I.3.5 Topologie du réseau                                                       | 6         |
| <b>Partie II — Sc1 — Calcul de référence détaillé</b>                           | <b>7</b>  |
| <b>II.1 Principes hydrauliques</b>                                              | <b>8</b>  |
| II.1.1 Débit, vitesse et section                                                | 8         |
| II.1.2 Pertes de charge linéaires — Darcy-Weisbach                              | 8         |
| II.1.3 Pertes de charge singulières                                             | 8         |
| II.1.4 Facteur de Christiansen — rampes à prises multiples                      | 8         |
| II.1.5 Interpolation pdc filtre                                                 | 9         |
| II.1.6 Interpolation courbe pompe                                               | 9         |
| <b>II.2 Résultats — régime établi</b>                                           | <b>9</b>  |
| II.2.1 Bilan des pertes de charge — chemin critique (pompe → B2 → dernier asp.) | 9         |
| II.2.2 Profil de pression                                                       | 10        |
| <b>II.3 Vérification de tenue en pression — PN6</b>                             | <b>10</b> |
| <b>II.4 Équilibrage des rampes</b>                                              | <b>11</b> |
| <b>II.5 Remplissage initial</b>                                                 | <b>11</b> |
| <b>II.6 Synthèse</b>                                                            | <b>12</b> |
| <b>Partie III — Scénarios alternatifs — explorations aux limites</b>            | <b>13</b> |

|                                                                                                 |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>III.1 Scénarios Sc2 à Sc5 — calculs détaillés.....</b>                                       | <b>14</b> |
| III.1.1 Sc2 — 3 rampes DN32 — B3@140m, B1@160m, B2@180m — sans filtre.....                      | 14        |
| III.1.2 Sc3 — 4 rampes DN32 — B4@120m, B3@140m, B1@160m, B2@180m — sans filtre.....             | 16        |
| III.1.3 Sc4 — 1 rampe DN32 × 50 m (12 asp.) — nourrice 150 m — sans filtre — union direct.....  | 17        |
| III.1.4 Sc5 — 1 rampe DN32 × 100 m (37 asp.) — nourrice 100 m — sans filtre — union direct..... | 19        |
| <b>Partie IV — Synthèse comparative des scénarios .....</b>                                     | <b>23</b> |
| <b>IV.1 Tableau comparatif des scénarios.....</b>                                               | <b>24</b> |
| IV.1.1 Courbes comparatives.....                                                                | 24        |
| <b>IV.2 Analyse et conclusions.....</b>                                                         | <b>25</b> |
| <b>Annexe — Données d'entrée et guide de modification .....</b>                                 | <b>27</b> |
| <b>A.1 Pipeline de calcul.....</b>                                                              | <b>28</b> |
| A.1.1 Ajouter ou modifier un scénario.....                                                      | 28        |
| <b>A.2 Données d'entrée — config_inputs.json.....</b>                                           | <b>29</b> |
| <b>A.3 Script de calcul — NT_P1_hydraulique-irrigation_calc.py.....</b>                         | <b>32</b> |
| A.3.1 Hydraulique de base — Darcy-Weisbach, Colebrook-White, Christiansen.....                  | 32        |
| A.3.2 Interpolation courbe pompe.....                                                           | 33        |
| A.3.3 Filtre à tamis.....                                                                       | 33        |
| A.3.4 Calcul réseau générique N branches.....                                                   | 33        |
| A.3.5 Volume et temps de remplissage.....                                                       | 37        |
| A.3.6 Boucle principale — lecture scénarios et écriture résultats.....                          | 37        |
| <b>A.4 En pratique : installation du réseau d'irrigation.....</b>                               | <b>38</b> |
| A.4.1 Nourrice DN63 — déroulage et tirage.....                                                  | 38        |
| A.4.2 Raccordement des Tés DN63.....                                                            | 40        |
| A.4.3 Raccordement d'une rampe : té, vanne d'équilibrage, asperseurs.....                       | 40        |
| <b>A.5 Références et méthodes.....</b>                                                          | <b>41</b> |
| A.5.1 Méthodes de calcul.....                                                                   | 41        |
| A.5.2 Matériel du réseau.....                                                                   | 42        |
| A.5.3 Liens internes.....                                                                       | 42        |

## Suivi des versions

| Version | Date       | Auteur | Modifications                                                                                                                                                                          |
|---------|------------|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0.1     | 2026-04-10 | OLT    | Calcul paramétrique initial — scénarios 1 à 5c.                                                                                                                                        |
| 1.0     | 2026-04-17 | OLT    | Note technique pédagogique complète — comparaison 7 scénarios.                                                                                                                         |
| 2.0     | 2026-04-17 | OLT    | Scénario unique worst-case, courbe pompe estimée, asperseurs autorégulants 5 L/min, vérification PN4, temps de remplissage.                                                            |
| 3.0     | 2026-04-17 | OLT    | Analyse multi-scénarios (Sc1→Sc3) : extension progressive du réseau jusqu'à la limite de pression 0,9 bar. Tableau comparatif et courbes par scénario.                                 |
| 4.0     | 2026-04-18 | OLT    | Nourrice en DN32 (Ø int. 30 mm) + réduction DN80→DN32 (K = 0,25). Les 3 scénarios sont non-fonctionnels : pertes nourrice » pression pompe.                                            |
| 5.0     | 2026-04-18 | OLT    | Sc4 ajouté : 1 rampe DN32 × 50 m, nourrice 150 m, sans filtre, raccord union direct. Seul scénario fonctionnel (P crit. = 1,97 bar ✓). Rampes aussi en DN32.                           |
| 6.0     | 2026-04-19 | OLT    | Sc4 corrigé : 17 asp./rampe 50 m. Sc5 ajouté : 37 asp./rampe 100 m, nourrice 100 m, avec filtre. Topologie nourrice non-bouchée. Recherche de la limite du système.                    |
| 7.0     | 2026-04-20 | OLT    | Nourrice DN63 PN6 (Ø int. 55,4 mm, e = 3,8 mm). Suppression filtre sur tous les scénarios (filtre DN32 incompatible DN63 — hydrocyclone + filtre à sable envisagés). Recalcul complet. |

## PARTIE I

## Contexte et objectifs

*Une parcelle de 40 × 200 m en bordure de Durance, sans électricité, à irriguer avec une motopompe diesel et des asperseurs autorégulants. La nourrice DN63 retenue ici remplace un DN32 qui s'est révélé insuffisant lors de la campagne précédente.*

*Cette note analyse 5 configurations (**Sc1**, **Sc2**, **Sc3**, **Sc4**, **Sc5**) en cherchant la limite de faisabilité fixée à 1.5 bar au dernier asperseur du chemin critique. **Partie II** détaille la méthode et le calcul de référence Sc1 pas à pas ; **Partie III** couvre les scénarios alternatifs ; **Partie IV** compare l'ensemble et conclut.*

## I.1 Contexte

### I.1.1 La parcelle

La parcelle à irriguer est une bande de **40 m × 200 m** en bordure de Durance, cultivée en pommes de terre, ail et autres légumes à bulbes. Le sol est sablo-limoneux sur lit alluvionnaire — perméable et drainant, ce qui impose un arrosage fréquent en saison chaude.

### I.1.2 Configuration du réseau — hypothèses communes

Cette note étudie une configuration volontairement contraignante<sup>1</sup> : canalisations de petit diamètre (DN63), nourrice longue de 200 m, rampes de 30 m avec 10 asperseurs autorégulants chacune.

| Composant      | Description                                                                                                    |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aspiration     | PVC annelé PVC annelé SN4 · Ø73 mm ext. / Ø63 mm int. · 5 m                                                    |
| Réduction      | Réduction conique courte DN80→DN63 ( $K = 0.25$ )                                                              |
| Filtre à tamis | <i>Non installé</i> — filtre DN32 incompatible avec la nourrice DN63. Hydrocyclone + filtre à sable envisagés. |
| Nourrice       | PEHD PN6 (SDR≈17) · Ø63 mm ext. / Ø55.4 mm int. · 200 m — <b>bouchée à l'extrémité</b>                         |
| Rampes         | Toutes identiques · Ø30 mm int. · 30 m · 10 asperseurs + vanne d'équilibrage — bouchées à l'extrémité          |
| Asperseurs     | Autorégulant · 5 L/min · pression d'activation ≥ 1.5 bar                                                       |

**Réseau en cul-de-sac** : la nourrice et les rampes sont bouchées à l'extrémité opposée à la pompe. La pression monte jusqu'à l'équilibre. Cette configuration est la plus défavorable pour les pertes de charge en régime établi et la plus favorable pour la montée en pression (charge nulle en bout de réseau au démarrage).

La nourrice DN63 a été retenue suite aux limites du DN32 observées lors de la campagne précédente — voir §Rappel historique en Partie IV.

### I.1.3 Scénarios étudiés

Cinq configurations sont analysées, correspondant à des topologies de réseau progressivement contraignantes. La rampe la plus éloignée constitue le **chemin critique** (plus grande distance à la pompe) et varie selon le scénario.

| Scénario   | Rampes | Q total (L/min) | Positions des rampes               |
|------------|--------|-----------------|------------------------------------|
| <b>Sc1</b> | 2      | 100             | B@160 m, B@180 m                   |
| <b>Sc2</b> | 3      | 150             | B@140 m, B@160 m, B@180 m          |
| <b>Sc3</b> | 4      | 200             | B@120 m, B@140 m, B@160 m, B@180 m |
| <b>Sc4</b> | 1      | 60              | B@150 m                            |
| <b>Sc5</b> | 1      | 185             | B@100 m                            |

La méthode de calcul est présentée en Partie II, qui développe le scénario de référence Sc1 pas à pas.

<sup>1</sup>avec un refoulement en DN100 les pertes seraient bien inférieures

## I.2 Objectifs

1. Vérifier la faisabilité hydraulique du scénario de base (Sc1 — 2 rampes) : la motopompe peut-elle fournir le débit et la pression requis pour activer tous les asperseurs ?
2. Calculer les pertes de charge segment par segment pour chaque scénario et identifier les postes dominants.
3. Vérifier que la pression au dernier asperseur de la rampe la plus éloignée (chemin critique) reste  $\geq 1.5$  bar pour les cinq scénarios.
4. Déterminer la limite pratique d'extension du réseau (nombre maximal de rampes simultanées).
5. Vérifier la tenue en pression :  $P_{\text{max pompe}} \leq \text{PN6}$  pour tous les scénarios.
6. Estimer le temps de remplissage initial.

## I.3 Équipements

### I.3.1 Motopompe

Motopompe diesel **Blackstone BD8000ES/AgriEuro** — caractéristiques nominales :

| Paramètre           | Valeur            | Note                                                   |
|---------------------|-------------------|--------------------------------------------------------|
| Débit max.          | <b>1000 L/min</b> | Débit à refoulement libre — non atteint avec ce réseau |
| Pression max. (Q=0) | <b>30 mCE</b>     | = 30 / 10.0 bar — à vide                               |
| Aspiration max.     | <b>6 mCE</b>      | Ne pas dépasser côté aspiration                        |
| Sortie pompe        | <b>DN80</b>       | 3 pouces — réduit à DN63 par le raccord de sortie      |

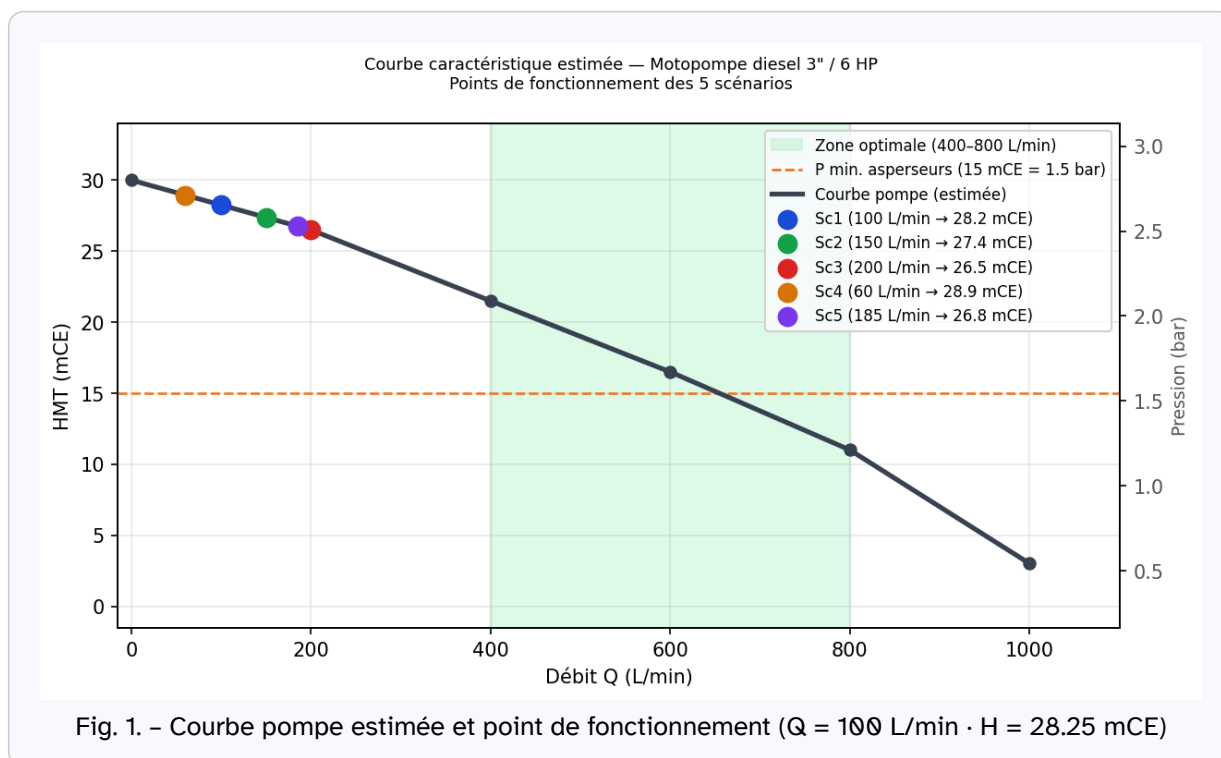
**Note fabricant :** en attente de la courbe débit/pression détaillée pour le modèle Blackstone BD8000ES/AgriEuro<sup>2</sup>. La courbe a été estimée d'après des pompes centrifuges similaires — les résultats sont à confirmer à réception de la vraie courbe.

#### I.3.1.1 Courbe pompe estimée

La courbe débit-pression a été estimée d'après des pompes diesel centrifuges similaires (Estimation d'après pompes diesel 80 mm / 6 HP similaires) :

| Q (L/min) | H (mCE) | P (bar) |
|-----------|---------|---------|
| 0         | 30      | 3       |
| 200       | 26.5    | 2.65    |
| 400       | 21.5    | 2.15    |
| 600       | 16.5    | 1.65    |
| 800       | 11      | 1.1     |
| 1000      | 3       | 0.3     |

<sup>2</sup>en attente de la vraie courbe fournie par le constructeur



**Plage de bon rendement :** entre 400 et 800 L/min. Le point de fonctionnement à  $Q = 100 \text{ L/min}$  est très bas — la pompe est surdimensionnée pour ce réseau. En pratique, elle fonctionne à pression quasi maximale.

### I.3.2 Filtre à tamis

**Non installé dans la configuration actuelle.** Le filtre à tamis prévu (Filtre à tamis 1"½ plastique, DN40) est incompatible avec la nourrice DN63 — les connexions sont en DN32. Une solution de filtration adaptée (hydrocyclone + filtre à sable en DN63 ou DN80) est à prévoir pour les campagnes suivantes. Les calculs ci-dessous sont menés sans filtre (no\_filter: true sur tous les scénarios).

| Paramètre     | Valeur (référence)                  | Note                                  |
|---------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Type          | <b>Filtre à tamis 1"½ plastique</b> | Non installé — pour référence         |
| Finesse       | <b>130 µm</b>                       | Retient sable et particules > 0.13 mm |
| Ø intérieur   | <b>40 mm</b>                        | Connexions DN32 — incompatible DN63   |
| Débit max.    | <b>233 L/min</b>                    |                                       |
| Pression max. | <b>6 bar</b>                        |                                       |

### I.3.3 Canalisations

| Tronçon    | Matériau          | Ø ext. (mm) | Ø int. (mm) | Long. (m) | Note                                         |
|------------|-------------------|-------------|-------------|-----------|----------------------------------------------|
| Aspiration | PVC annelé SN4    | 73          | 63          | 5         | Sous dépression — résiste à l'écrasement     |
| Nourrice   | PEHD PN6 (SDR≈17) | 63          | 55.4        | 200       | PN6 = 6 bar nominal — <b>bouchée au bout</b> |

| Tronçon  | Matériau | Ø ext. (mm) | Ø int. (mm) | Long. (m) | Note                                                                  |
|----------|----------|-------------|-------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------|
| Rampe B1 | PEHD     | —           | 30          | 30        | Position 160 m · 10 asp. · vanne équilibrage                          |
| Rampe B2 | PEHD     | —           | 30          | 30        | Position 180 m · 10 asp. · vanne équilibrage — <b>chemin critique</b> |

### I.3.4 Asperseurs

| Paramètre          | Valeur                  | Note                                                    |
|--------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------|
| Type               | <b>Autorégulant</b>     | Débit constant quelle que soit la pression $\geq$ seuil |
| Débit unitaire     | <b>5 L/min</b>          | Constant dès $P \geq 1.5$ bar                           |
| Seuil d'activation | <b>1.5 bar (15 mCE)</b> | En dessous : jets courts ou pas de jet                  |
| Nombre par rampe   | <b>10</b>               | 2 rampes identiques                                     |
| Total              | <b>20</b>               | Fonctionnement simultané                                |
| Débit réseau total | <b>100 L/min</b>        | $= 20 \times 5$                                         |

**Note :** Débit constant 5 L/min dès  $P \geq 1,5$  bar — jets courts sous 1,5 bar

### I.3.5 Topologie du réseau

|    |                                                                                                                             |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Source (Durance – puits artésien)                                                                                           |
| 2  |                                                                                                                             |
| 3  | Aspiration PVC annelé DN73 × 5 m                                                                                            |
| 4  |                                                                                                                             |
| 5  | [POMPE DN80] ← motopompe diesel                                                                                             |
| 6  |                                                                                                                             |
| 7  | Réduction conique DN80 → DN63 ( $K = 0.25$ )                                                                                |
| 8  |                                                                                                                             |
| 9  | [FILTRE tamis 1"½ – 40 mm int.]                                                                                             |
| 10 |                                                                                                                             |
| 11 | Nourrice PEHD PN6 DN63 × 200 m  BOUCHÉE |
| 12 |                                                                                                                             |
| 13 | — Té DN63 — Rampe B1 (à 160 m) → 10 asp. × 5 L/min — BOUCHÉE                                                                |
| 14 | (+ vanne équilibrage)                                                                                                       |
| 15 |                                                                                                                             |
| 16 | — Té DN63 — Rampe B2 (à 180 m) → 10 asp. × 5 L/min — BOUCHÉE                                                                |
| 17 | (+ vanne équilibrage) [CHEMIN CRITIQUE]                                                                                     |

**Chemin critique :** le calcul de pression minimale porte sur la Rampe B2 — la plus éloignée (180 m), raccordée en passage latéral au Té 2.



## PARTIE II

**Sc1 — Calcul de référence détaillé**

*Méthode hydraulique (Darcy-Weisbach, Colebrook-White, Christiansen) et résultats complets du scénario de référence Sc1 : bilan des pertes de charge segment par segment, profils de pression, vérification PN4, réglage des vannes d'équilibrage et temps de remplissage initial.*

## II.1 Principes hydrauliques

Les pertes de charge sont calculées tronçon par tronçon selon les équations suivantes, appliquées identiquement à chacun des cinq scénarios.

### II.1.1 Débit, vitesse et section

$$Q = v \times A = v \times \frac{\pi D^2}{4} \Rightarrow v = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

Le débit réseau en régime établi est  $Q = 100 \text{ L/min} = 0.00167 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### II.1.2 Pertes de charge linéaires — Darcy-Weisbach

$$h_f = \lambda \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g}$$

Le facteur de frottement  $\lambda$  est calculé par l'équation de **Colebrook-White** (itération) :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left( \frac{\varepsilon}{3.7D} + 2.5 \frac{51}{\Re \sqrt{\lambda}} \right)$$

avec  $\Re = v \frac{D}{\nu}$  (régime turbulent,  $\text{Re} > 10\,000$  dans tous les tronçons).

### II.1.3 Pertes de charge singulières

$$h_s = K \times \frac{v^2}{2g}$$

Coefficients utilisés :

| Singularité                                          | K    | Note                                                                                                    |
|------------------------------------------------------|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Réduction conique Réduction conique courte DN80→DN63 | 0.25 | Coeff. perte contraction conique — rapport sections $(63/80)^2 \approx 0.64 \rightarrow K \approx 0.25$ |
| Té — passage direct                                  | 0.3  | Flux rectiligne                                                                                         |
| Té — passage latéral                                 | 1.3  | Flux dévié à 90° — pertes 4x plus importantes                                                           |
| Vanne 1/4 tour ouverte (Vanne à bille 1/4 tour DN50) | 0.5  | Vanne entièrement ouverte                                                                               |

### II.1.4 Facteur de Christiansen — rampes à prises multiples

Une rampe avec  $N$  asperseurs distribués uniformément : le débit diminue d'une prise à l'autre. La perte de charge est inférieure à la perte à plein débit :

$$F = \frac{(N+1)(2N+1)}{6N^2} \rightarrow h_{\text{rampe}} = F \times h_{\text{plein débit}}$$

Pour  $N = 10$  asperseurs :  $F = 0.385$  (les pertes réelles valent  $\approx 39\%$  de la perte à plein débit).

Ce facteur s'applique car les asperseurs autorégulants ont un débit **uniforme** — l'hypothèse d'une distribution régulière du débit est vérifiée.

## II.1.5 Interpolation pdc filtre

La perte de charge du filtre est interpolée linéairement à partir des tables pdc\_table\_clean et pdc\_table\_dirty fournies par le fabricant.

À  $Q = 100 \text{ L/min}$  (eau propre) :  $\Delta p_{\text{filtre}} = 0 \text{ bar} = 0 \text{ mCE}$ .

## II.1.6 Interpolation courbe pompe

La hauteur manométrique  $H(Q)$  est interpolée linéairement entre les 6 points tabulés.

À  $Q = 100 \text{ L/min}$  :  $H_{\text{pompe}} = 28.25 \text{ mCE}$ .

## II.2 Résultats — régime établi

Débit total :  $Q = 100 \text{ L/min}$  (20 asperseurs  $\times 5 \text{ L/min}$ ).

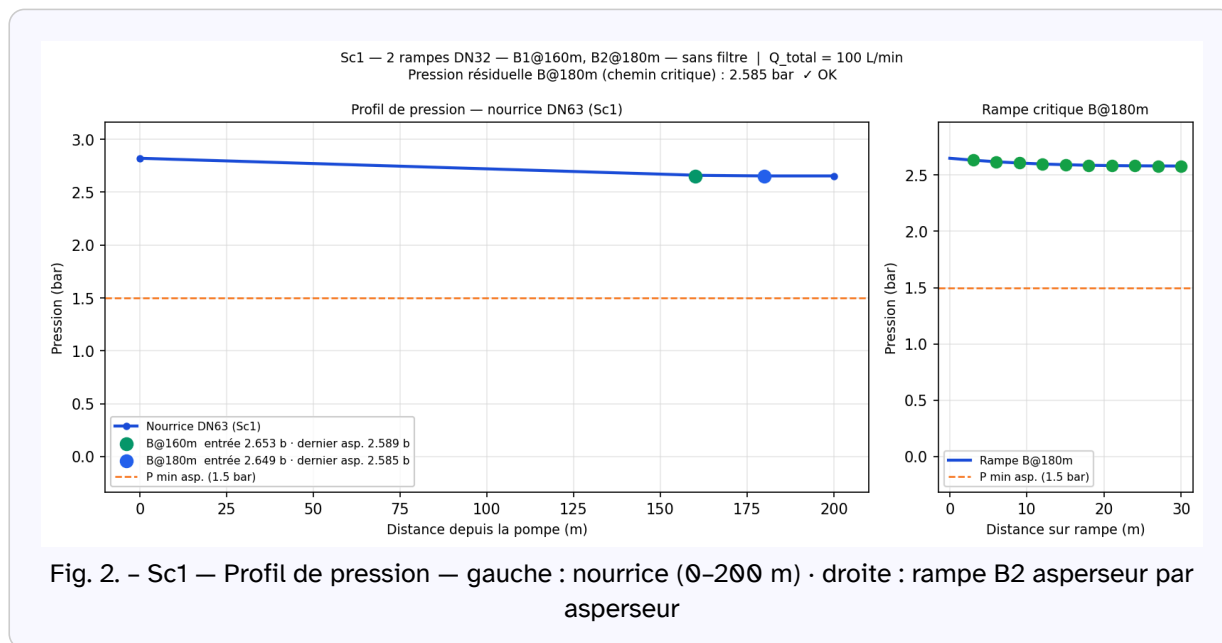
### II.2.1 Bilan des pertes de charge — chemin critique (pompe → B2 → dernier asp.)

| Poste                                                                    | Perte (mCE)                    | Vitesse (m/s) |
|--------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|---------------|
| Aspiration PVC annelé 63 mm int. · 5 m                                   | 0.043                          | 0.535         |
| Réduction conique Réduction conique courte<br>DN80 → DN63 ( $K = 0.25$ ) | 0.006                          | —             |
| Filtre supprimé (sans filtre)                                            | 0.00                           | —             |
| Nourrice 55.4 mm int. · 180 m (pompe → T1)                               | 1.602                          | 0.691         |
| Té 1 — passage direct ( $K = 0.3$ )                                      | 0.007                          | —             |
| Nourrice 55.4 mm int. · 20 m (T1 → T2)                                   | 0.058                          | 0.346         |
| Té 2 — passage latéral ( $K = 1.3$ ) — <b>critical</b>                   | 0.008                          | —             |
| Vanne équilibrage B2 ouverte ( $K = 0.5$ )                               | 0.035                          | —             |
| Rampe B2 · 30 mm int. · 30 m · $F = 0.385$                               | 0.643                          | 1.179         |
| <b>H résiduelle au dernier asperseur B2</b>                              | <b>25.85 mCE = 2.585 bar ✓</b> |               |

**Bilan :** pression au dernier asperseur B2 = **2.585 bar** >> seuil 1.5 bar ✓

La pompe est **très surdimensionnée** pour ce réseau ( $Q$  consommé =  $100 \text{ L/min}$  vs.  $Q$  max pompe =  $1000 \text{ L/min}$ ). Les pertes de charge sont dominées par la nourrice (1.602 mCE).

## II.2.2 Profil de pression



### II.2.2.1 Profil asperseur par asperseur — Rampe B2

| Asp. N° | x (m) | P (mCE) | P (bar) | Actif |
|---------|-------|---------|---------|-------|
| 1       | 3     | 26.32   | 2.632   | ✓ OK  |
| 2       | 6     | 26.18   | 2.618   | ✓ OK  |
| 3       | 9     | 26.07   | 2.607   | ✓ OK  |
| 4       | 12    | 25.98   | 2.598   | ✓ OK  |
| 5       | 15    | 25.92   | 2.592   | ✓ OK  |
| 6       | 18    | 25.87   | 2.587   | ✓ OK  |
| 7       | 21    | 25.84   | 2.584   | ✓ OK  |
| 8       | 24    | 25.82   | 2.582   | ✓ OK  |
| 9       | 27    | 25.81   | 2.581   | ✓ OK  |
| 10      | 30    | 25.8    | 2.58    | ✓ OK  |

Variation de pression entre le 1er et le dernier asperseur B2 : 0.052 bar — **uniformité quasi parfaite** grâce aux asperseurs autorégulants.

## II.3 Vérification de tenue en pression — PN6

La pression maximale dans le réseau est celle en sortie pompe à débit nul ( $Q = 0$ ) :  $H = 30$  mCE = **3 bar**.

| Paramètre                      | Valeur          | Limite      | Résultat |
|--------------------------------|-----------------|-------------|----------|
| Pression max. réseau ( $Q=0$ ) | <b>2.83 bar</b> | PN6 = 6 bar | ✓ OK     |
| Marge de sécurité              | <b>52.9 %</b>   | —           |          |

**PN6 ✓** — La pression maximale pompe à l'arrêt (2.83 bar) est inférieure à la pression nominale de la nourrice (PN6 = 6 bar). Marge de sécurité : 52.9 %.

En cas de coup de bélier (arrêt brutal de pompe), la surpression transitoire peut dépasser PN6. Prévoir une fermeture progressive de la vanne d'isolement à l'arrêt.

## II.4 Équilibrage des rampes

Les deux rampes B1 et B2 sont alimentées en dérivation. Sans équilibrage, B1 (plus proche) reçoit plus de pression que B2.

| Rampe        | P entrée (mCE) | P dernier asp. (bar) | Statut |
|--------------|----------------|----------------------|--------|
| B1 (à 160 m) | 26.53          | 2.589                | ✓ OK   |
| B2 (à 180 m) | 26.49          | 2.585                | ✓ OK   |

**Réglage vanne B1** : fermer partiellement pour dissiper **0.04 mCE** →  $K_{\text{requis}} = 0.56$ .

Avec des asperseurs autorégulants, l'équilibrage est moins critique qu'avec des asperseurs classiques : le débit reste identique dès lors que  $P > 1.5$  bar, quelle que soit la pression résiduelle. L'équilibrage améliore l'uniformité de portée des jets.

## II.5 Remplissage initial

Au premier démarrage, la pompe doit remplir l'ensemble du réseau avant que la pression monte et active les asperseurs.

| Volume                                           | Litres                   |
|--------------------------------------------------|--------------------------|
| Aspiration (63 mm int. · 5 m)                    | 15.6                     |
| Nourrice (55.4 mm int. · 200 m)                  | 482.1                    |
| Rampes B1 + B2 (30 mm int. · 60 m)               | 42.4                     |
| <b>Volume total</b>                              | <b>540.1 L</b>           |
| Débit remplissage estimé (Q pompe à H basse ≈ 0) | 198 L/min                |
| <b>Temps de remplissage</b>                      | <b>≈ 2.7 min (164 s)</b> |

Le débit de remplissage (198 L/min ≈ 11.9 m³/h) correspond au débit pompe en début de cycle, quand la pression réseau est encore nulle (Q élevé, H faible sur la courbe pompe). Le réseau est plein et sous pression en **moins de 3 minutes**.

Cette durée est **sous-estimée** : l'air contenu dans les canalisations doit être purgé par les buses des asperseurs, dont la section est très réduite. La perte de charge de l'air est inconnue et bien supérieure à celle de l'eau ; la montée en pression réelle sera plus longue. Prévoir un délai de 5 à 10 min avant d'observer un fonctionnement nominal.

## II.6 Synthèse

| Critère                                  | Résultat                     |
|------------------------------------------|------------------------------|
| Pression dernier asp. B2 (seuil 1.5 bar) | 2.585 bar ✓                  |
| Pression dernier asp. B1 (seuil 1.5 bar) | 2.589 bar ✓                  |
| Tenue en pression PN6 (P max = 2.83 bar) | ✓ OK — marge 52.9 %          |
| Aspiration pompe (seuil 6 mCE)           | ✓ OK — 0.043 mCE             |
| Temps de remplissage initial             | ≈ 2.7 min                    |
| Perte de charge dominante                | Nourrice DN63 mm (1.602 mCE) |
| Deuxième perte dominante                 | Rampe critique (0.643 mCE)   |

**La configuration est viable.** Tous les asperseurs sont alimentés bien au-dessus de leur seuil d'activation (1.5 bar). La tenue en pression PN6 est assurée avec une marge de 52.9 %. Le réseau est opérationnel en moins de 2.7 minutes.

**Points d'attention :**

- Fermer progressivement la vanne d'isolement à l'arrêt pour éviter les coups de bélier.
- Régler la vanne d'équilibrage B1 ( $K \approx 0.56$ ) pour homogénéiser les portées de jets.

**Suite :** les 4 configurations alternatives sont analysées de la même manière en Partie III, puis comparées en Partie IV.

## PARTIE III

# Scénarios alternatifs — explorations aux limites

*4 configurations alternatives à Sc1 (**Sc2, Sc3, Sc4, Sc5**) testent des topologies différentes — extensions multi-rampes et configurations single-rampe courte — pour explorer les limites du système. Calculs détaillés et profils de pression pour chaque configuration.*

## III.1 Scénarios Sc2 à Sc5 — calculs détaillés

**Rappel :** Sc1 (2 rampes à 160 et 180 m) est le scénario de référence, détaillé en Partie II. Les scénarios suivants testent des configurations alternatives : Sc2 et Sc3 étendent le réseau multi-rampes (3ème puis 4ème rampe), Sc4 et Sc5 explorent la limite du système avec une topologie single-rampe courte. Le chemin critique (rampe la plus éloignée) varie selon la topologie de chaque scénario.

### III.1.1 Sc2 — 3 rampes DN32 — B3@140m, B1@160m, B2@180m — sans filtre

#### III.1.1.1 Topologie

|    |                                                                                                               |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Source (Durance)                                                                                              |
| 2  |                                                                                                               |
| 3  | Aspiration DN73 × 5 m                                                                                         |
| 4  |                                                                                                               |
| 5  | [POMPE DN80] ← motopompe diesel                                                                               |
| 6  |                                                                                                               |
| 7  | Réduction DN80→DN63 (sans filtre)                                                                             |
| 8  |                                                                                                               |
| 9  | Nourrice PEHD PN6 DN63 × 200 m <span style="background-color: black; color: black;">XXXXXXXXXX</span> BOUCHÉE |
| 10 |                                                                                                               |
| 11 | └ Té DN63 — Rampe × 30 m → 50 L/min — BOUCHÉE                                                                 |
| 12 | └ Té DN63 — Rampe × 30 m → 50 L/min — BOUCHÉE                                                                 |
| 13 | └ Té DN63 — Rampe × 30 m → 50 L/min — BOUCHÉE [CHEMIN CRITIQUE]                                               |

Débit total : **Q = 150 L/min** (30 asperseurs × 5 L/min).

#### III.1.1.2 Bilan des pertes de charge — chemin critique (pompe → B@180 m → dernier asp.)

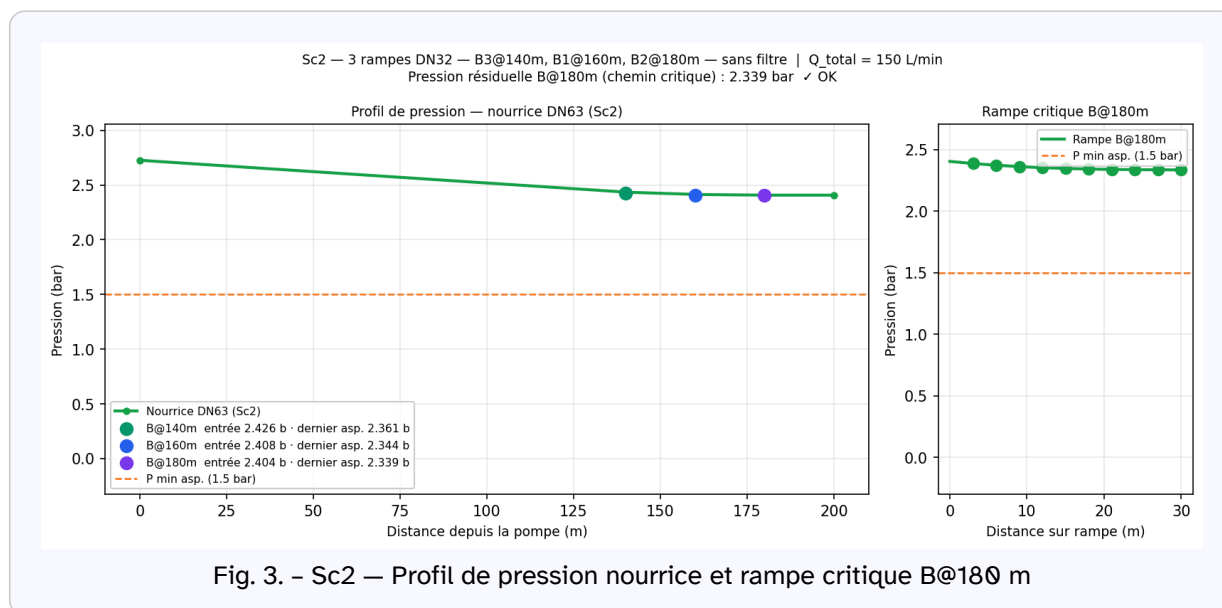
| Poste                                             | Perte (mCE)                    | Vitesse (m/s) |
|---------------------------------------------------|--------------------------------|---------------|
| Aspiration PVC annelé 63 mm · 5 m                 | 0.095                          | 0.802         |
| Réduction conique DN80→DN63 ( $K = 0.25$ )        | 0.014                          | —             |
| Filtre supprimé (sans filtre)                     | 0.00                           | —             |
| Nourrice 0→140 m · Q = 150 L/min                  | 2.904                          | 1.037         |
| Té T140 — direct ( $K = 0.3$ )                    | 0.016                          | —             |
| Nourrice 140→160 m · Q = 100 L/min                | 0.2                            | 0.691         |
| Té T160 — direct ( $K = 0.3$ )                    | 0.007                          | —             |
| Nourrice 160→180 m · Q = 50 L/min                 | 0.058                          | 0.346         |
| Té T180 — latéral (chemin critique) ( $K = 1.3$ ) | 0.008                          | —             |
| Vanne équilibrage (ouverte, $K = 0.5$ )           | 0.035                          | —             |
| Rampe critique · 30 mm · 30 m · $F = 0.385$       | 0.643                          | 1.179         |
| <b>H résiduelle — dernier asp. rampe critique</b> | <b>23.39 mCE = 2.339 bar ✓</b> |               |



## III.1.1.3 Pressions par rampe

| Rampe | Position (m) | P entrée (mCE) | P dernier asp. (bar) | Statut |
|-------|--------------|----------------|----------------------|--------|
| B@140 | 140          | 24.26          | 2.361                | ✓ OK   |
| B@160 | 160          | 24.08          | 2.344                | ✓ OK   |
| B@180 | 180          | 24.04          | 2.339                | ✓ OK   |

## III.1.1.4 Profil de pression



## III.1.1.5 Profil asperseur par asperseur — Rampe critique B@180 m

| Asp. N° | x (m) | P (mCE) | P (bar) | Actif |
|---------|-------|---------|---------|-------|
| 1       | 3     | 23.87   | 2.387   | ✓ OK  |
| 2       | 6     | 23.73   | 2.373   | ✓ OK  |
| 3       | 9     | 23.62   | 2.362   | ✓ OK  |
| 4       | 12    | 23.53   | 2.353   | ✓ OK  |
| 5       | 15    | 23.47   | 2.347   | ✓ OK  |
| 6       | 18    | 23.42   | 2.342   | ✓ OK  |
| 7       | 21    | 23.39   | 2.339   | ✓ OK  |
| 8       | 24    | 23.37   | 2.337   | ✓ OK  |
| 9       | 27    | 23.36   | 2.336   | ✓ OK  |
| 10      | 30    | 23.35   | 2.335   | ✓ OK  |

## III.1.2 Sc3 — 4 rampes DN32 — B4@120m, B3@140m, B1@160m, B2@180m — sans filtre

### III.1.2.1 Topologie

|    |                                                                                                               |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Source (Durance)                                                                                              |
| 2  |                                                                                                               |
| 3  | Aspiration DN73 × 5 m                                                                                         |
| 4  |                                                                                                               |
| 5  | [POMPE DN80] ← motopompe diesel                                                                               |
| 6  |                                                                                                               |
| 7  | Réduction DN80→DN63 (sans filtre)                                                                             |
| 8  |                                                                                                               |
| 9  | Nourrice PEHD PN6 DN63 × 200 m <span style="background-color: black; color: black;">XXXXXXXXXX</span> BOUCHÉE |
| 10 |                                                                                                               |
| 11 | └ Té DN63 — Rampe × 30 m → 50 L/min — BOUCHÉE                                                                 |
| 12 | └ Té DN63 — Rampe × 30 m → 50 L/min — BOUCHÉE                                                                 |
| 13 | └ Té DN63 — Rampe × 30 m → 50 L/min — BOUCHÉE                                                                 |
| 14 | └ Té DN63 — Rampe × 30 m → 50 L/min — BOUCHÉE [CHEMIN CRITIQUE]                                               |

Débit total : **Q = 200 L/min** (40 asperseurs × 5 L/min).

### III.1.2.2 Bilan des pertes de charge — chemin critique (pompe → B@180 m → dernier asp.)

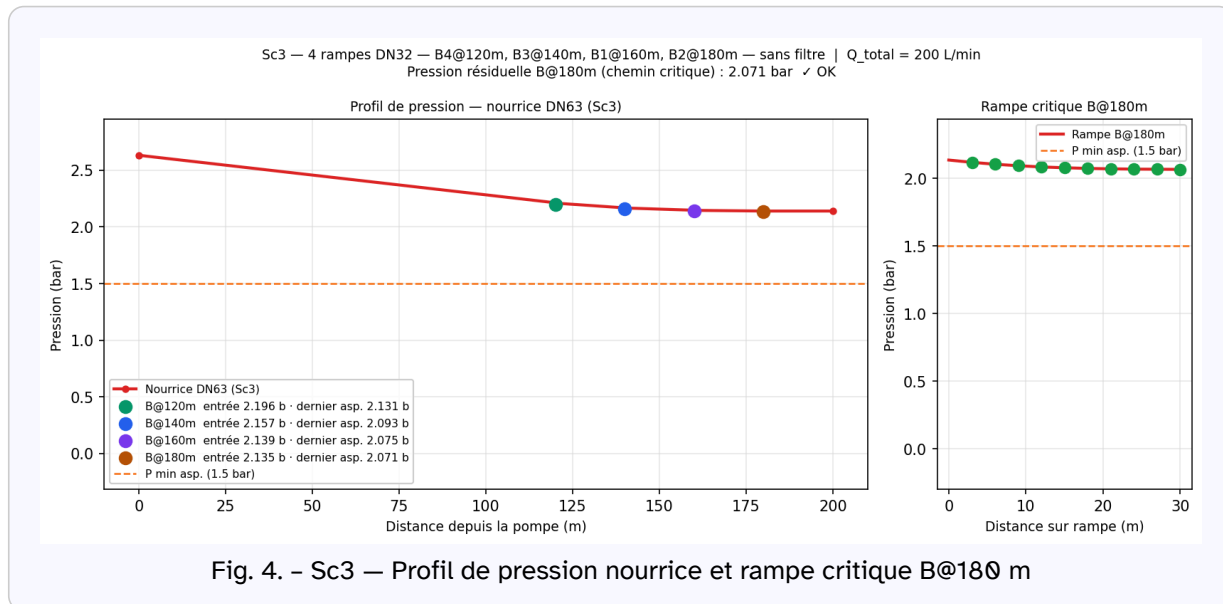
| Poste                                             | Perte (mCE)                    | Vitesse (m/s) |
|---------------------------------------------------|--------------------------------|---------------|
| Aspiration PVC annelé 63 mm · 5 m                 | 0.167                          | 1.069         |
| Réduction conique DN80→DN63 ( $K = 0.25$ )        | 0.024                          | —             |
| Filtre supprimé (sans filtre)                     | 0.00                           | —             |
| Nourrice 0→120 m · Q = 200 L/min                  | 4.19                           | 1.383         |
| Té T120 — direct ( $K = 0.3$ )                    | 0.029                          | —             |
| Nourrice 120→140 m · Q = 150 L/min                | 0.415                          | 1.037         |
| Té T140 — direct ( $K = 0.3$ )                    | 0.016                          | —             |
| Nourrice 140→160 m · Q = 100 L/min                | 0.2                            | 0.691         |
| Té T160 — direct ( $K = 0.3$ )                    | 0.007                          | —             |
| Nourrice 160→180 m · Q = 50 L/min                 | 0.058                          | 0.346         |
| Té T180 — latéral (chemin critique) ( $K = 1.3$ ) | 0.008                          | —             |
| Vanne équilibrage (ouverte, $K = 0.5$ )           | 0.035                          | —             |
| Rampe critique · 30 mm · 30 m · $F = 0.385$       | 0.643                          | 1.179         |
| <b>H résiduelle — dernier asp. rampe critique</b> | <b>20.71 mCE = 2.071 bar ✓</b> |               |

### III.1.2.3 Pressions par rampe

| Rampe | Position (m) | P entrée (mCE) | P dernier asp. (bar) | Statut |
|-------|--------------|----------------|----------------------|--------|
| B@120 | 120          | 21.96          | 2.131                | ✓ OK   |
| B@140 | 140          | 21.57          | 2.093                | ✓ OK   |
| B@160 | 160          | 21.39          | 2.075                | ✓ OK   |

| Rampe | Position (m) | P entrée (mCE) | P dernier asp. (bar) | Statut |
|-------|--------------|----------------|----------------------|--------|
| B@180 | 180          | 21.35          | 2.071                | ✓ OK   |

### III.1.2.4 Profil de pression



### III.1.2.5 Profil asperseur par asperseur — Rampe critique B@180 m

| Asp. N° | x (m) | P (mCE) | P (bar) | Actif |
|---------|-------|---------|---------|-------|
| 1       | 3     | 21.18   | 2.118   | ✓ OK  |
| 2       | 6     | 21.04   | 2.104   | ✓ OK  |
| 3       | 9     | 20.93   | 2.093   | ✓ OK  |
| 4       | 12    | 20.84   | 2.084   | ✓ OK  |
| 5       | 15    | 20.78   | 2.078   | ✓ OK  |
| 6       | 18    | 20.73   | 2.073   | ✓ OK  |
| 7       | 21    | 20.7    | 2.07    | ✓ OK  |
| 8       | 24    | 20.68   | 2.068   | ✓ OK  |
| 9       | 27    | 20.67   | 2.067   | ✓ OK  |
| 10      | 30    | 20.66   | 2.066   | ✓ OK  |

## III.1.3 Sc4 — 1 rampe DN32 × 50 m (12 asp.) — nourrice 150 m — sans filtre — union direct

### III.1.3.1 Topologie

|   |                  |
|---|------------------|
| 1 | Source (Durance) |
| 2 |                  |

|    |                                                                                |                                       |
|----|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| 3  |                                                                                | Aspiration DN73 × 5 m                 |
| 4  |                                                                                |                                       |
| 5  | [POMPE DN80]                                                                   | ← motopompe diesel                    |
| 6  |                                                                                |                                       |
| 7  |                                                                                | Réduction DN80→DN63 (sans filtre)     |
| 8  |                                                                                |                                       |
| 9  |                                                                                | Nourrice PEHD PN6 DN63 × 150 m —————→ |
| 10 |                                                                                |                                       |
| 11 | └─ Raccord union direct — Rampe × 50 m —→ 60 L/min — BOUCHÉE [CHEMIN CRITIQUE] |                                       |

Débit total : **Q = 60 L/min** (12 asperseurs × 5 L/min).

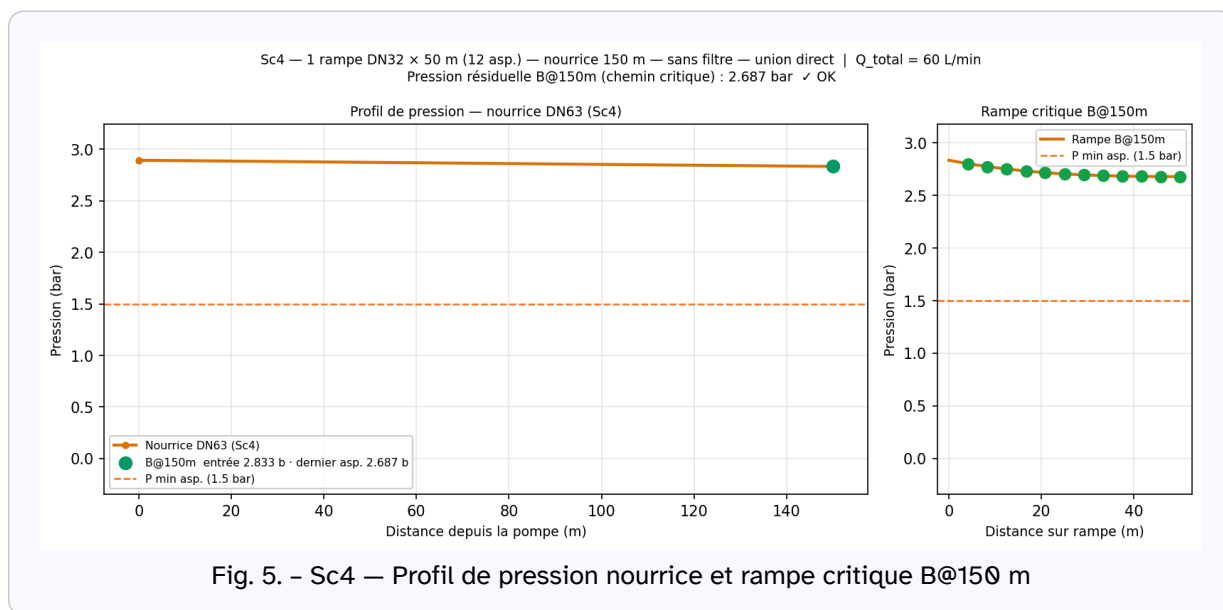
### III.1.3.2 Bilan des pertes de charge — chemin critique (pompe → B@150 m → dernier asp.)

| Poste                                             | Perte (mCE)                    | Vitesse (m/s) |
|---------------------------------------------------|--------------------------------|---------------|
| Aspiration PVC annelé 63 mm · 5 m                 | 0.016                          | 0.321         |
| Réduction conique DN80→DN63 ( $K = 0.25$ )        | 0.002                          | —             |
| Filtre supprimé (sans filtre)                     | 0.00                           | —             |
| Nourrice 0→150 m · Q = 60 L/min                   | 0.605                          | 0.415         |
| Raccord union direct ( $K = 0.05$ )               | 0                              | —             |
| Vanne équilibrage (ouverte, $K = 0.5$ )           | 0                              | —             |
| Rampe critique · 30 mm · 50 m · $F = 0.376$       | 1.455                          | 1.415         |
| <b>H résiduelle — dernier asp. rampe critique</b> | <b>26.87 mCE = 2.687 bar ✓</b> |               |

### III.1.3.3 Pressions par rampe

| Rampe | Position (m) | P entrée (mCE) | P dernier asp. (bar) | Statut |
|-------|--------------|----------------|----------------------|--------|
| B@150 | 150          | 28.33          | 2.687                | ✓ OK   |

### III.1.3.4 Profil de pression



### III.1.3.5 Profil asperseur par asperseur — Rampe critique B@150 m

| Asp. N° | x (m) | P (mCE) | P (bar) | Actif |
|---------|-------|---------|---------|-------|
| 1       | 4.2   | 28.01   | 2.801   | ✓ OK  |
| 2       | 8.3   | 27.73   | 2.773   | ✓ OK  |
| 3       | 12.5  | 27.5    | 2.75    | ✓ OK  |
| 4       | 16.7  | 27.31   | 2.731   | ✓ OK  |
| 5       | 20.8  | 27.15   | 2.715   | ✓ OK  |
| 6       | 25    | 27.03   | 2.703   | ✓ OK  |
| 7       | 29.2  | 26.94   | 2.694   | ✓ OK  |
| 8       | 33.3  | 26.87   | 2.687   | ✓ OK  |
| 9       | 37.5  | 26.82   | 2.682   | ✓ OK  |
| 10      | 41.7  | 26.8    | 2.68    | ✓ OK  |
| 11      | 45.8  | 26.78   | 2.678   | ✓ OK  |
| 12      | 50    | 26.78   | 2.678   | ✓ OK  |

### III.1.4 Sc5 — 1 rampe DN32 x 100 m (37 asp.) — nourrice 100 m — sans filtre — union direct

#### III.1.4.1 Topologie

|   |                       |
|---|-----------------------|
| 1 | Source (Durance)      |
| 2 |                       |
| 3 | Aspiration DN73 x 5 m |
| 4 |                       |

|    |                                                                              |
|----|------------------------------------------------------------------------------|
| 5  | [POMPE DN80] ← motopompe diesel                                              |
| 6  |                                                                              |
| 7  | Réduction DN80→DN63 (sans filtre)                                            |
| 8  |                                                                              |
| 9  | Nourrice PEHD PN6 DN63 × 100 m →                                             |
| 10 |                                                                              |
| 11 | Raccord union direct — Rampe × 100 m → 185 L/min — BOUCHÉE [CHEMIN CRITIQUE] |

Débit total : **Q = 185 L/min** (37 asperseurs × 5 L/min).

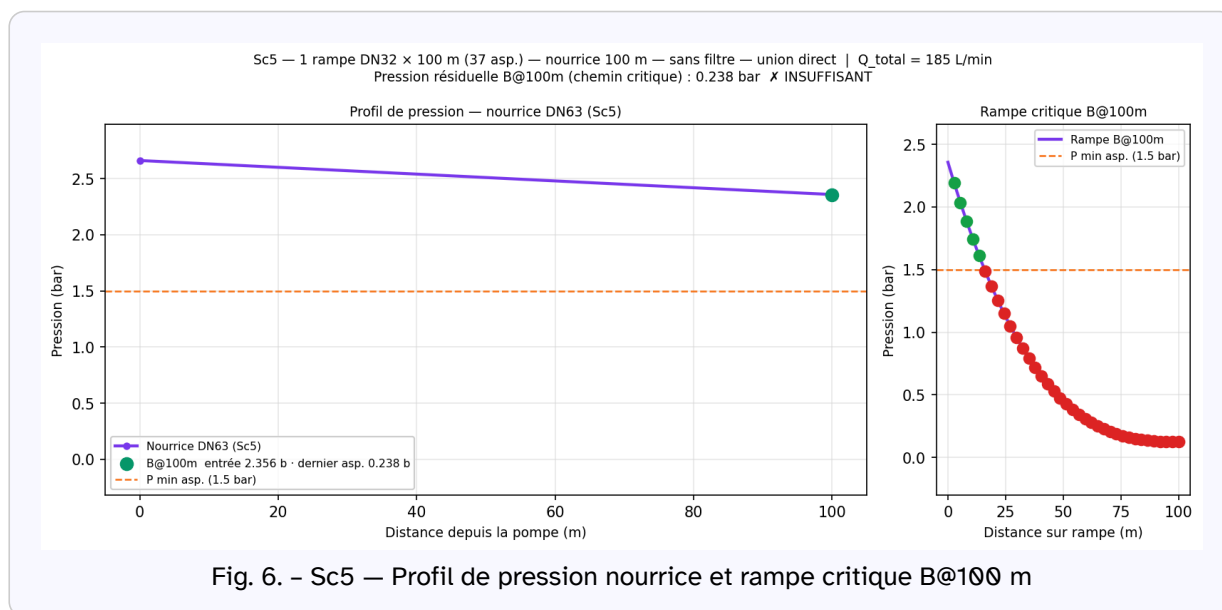
### III.1.4.2 Bilan des pertes de charge — chemin critique (pompe → B@100 m → dernier asp.)

| Poste                                             | Perte (mCE)                   | Vitesse (m/s) |
|---------------------------------------------------|-------------------------------|---------------|
| Aspiration PVC annelé 63 mm · 5 m                 | 0.143                         | 0.989         |
| Réduction conique DN80→DN63 ( $K = 0.25$ )        | 0.021                         | —             |
| Filtre supprimé (sans filtre)                     | 0.00                          | —             |
| Nourrice 0→100 m · Q = 185 L/min                  | 3.031                         | 1.279         |
| Raccord union direct ( $K = 0.05$ )               | 0.004                         | —             |
| Vanne équilibrage (ouverte, $K = 0.5$ )           | 0                             | —             |
| Rampe critique · 30 mm · 100 m · $F = 0.347$      | 21.188                        | 4.362         |
| <b>H résiduelle — dernier asp. rampe critique</b> | <b>2.38 mCE = 0.238 bar X</b> |               |

### III.1.4.3 Pressions par rampe

| Rampe | Position (m) | P entrée (mCE) | P dernier asp. (bar) | Statut        |
|-------|--------------|----------------|----------------------|---------------|
| B@100 | 100          | 23.56          | 0.238                | X hors limite |

### III.1.4.4 Profil de pression



## III.1.4.5 Profil asperseur par asperseur — Rampe critique B@100 m

| Asp. N° | x (m) | P (mCE) | P (bar) | Actif         |
|---------|-------|---------|---------|---------------|
| 1       | 2.7   | 21.91   | 2.191   | ✓ OK          |
| 2       | 5.4   | 20.34   | 2.034   | ✓ OK          |
| 3       | 8.1   | 18.85   | 1.885   | ✓ OK          |
| 4       | 10.8  | 17.44   | 1.744   | ✓ OK          |
| 5       | 13.5  | 16.11   | 1.611   | ✓ OK          |
| 6       | 16.2  | 14.85   | 1.485   | X hors limite |
| 7       | 18.9  | 13.66   | 1.366   | X hors limite |
| 8       | 21.6  | 12.54   | 1.254   | X hors limite |
| 9       | 24.3  | 11.49   | 1.149   | X hors limite |
| 10      | 27    | 10.51   | 1.051   | X hors limite |
| 11      | 29.7  | 9.59    | 0.959   | X hors limite |
| 12      | 32.4  | 8.73    | 0.873   | X hors limite |
| 13      | 35.1  | 7.94    | 0.794   | X hors limite |
| 14      | 37.8  | 7.2     | 0.72    | X hors limite |
| 15      | 40.5  | 6.51    | 0.651   | X hors limite |
| 16      | 43.2  | 5.88    | 0.588   | X hors limite |
| 17      | 45.9  | 5.3     | 0.53    | X hors limite |
| 18      | 48.6  | 4.77    | 0.477   | X hors limite |
| 19      | 51.4  | 4.29    | 0.429   | X hors limite |
| 20      | 54.1  | 3.85    | 0.385   | X hors limite |
| 21      | 56.8  | 3.46    | 0.346   | X hors limite |
| 22      | 59.5  | 3.11    | 0.311   | X hors limite |
| 23      | 62.2  | 2.79    | 0.279   | X hors limite |
| 24      | 64.9  | 2.52    | 0.252   | X hors limite |
| 25      | 67.6  | 2.28    | 0.228   | X hors limite |
| 26      | 70.3  | 2.07    | 0.207   | X hors limite |
| 27      | 73    | 1.89    | 0.189   | X hors limite |
| 28      | 75.7  | 1.74    | 0.174   | X hors limite |
| 29      | 78.4  | 1.61    | 0.161   | X hors limite |
| 30      | 81.1  | 1.51    | 0.151   | X hors limite |
| 31      | 83.8  | 1.43    | 0.143   | X hors limite |
| 32      | 86.5  | 1.37    | 0.137   | X hors limite |
| 33      | 89.2  | 1.33    | 0.133   | X hors limite |
| 34      | 91.9  | 1.3     | 0.13    | X hors limite |

| Asp. N° | x (m) | P (mCE) | P (bar) | Actif         |
|---------|-------|---------|---------|---------------|
| 35      | 94.6  | 1.28    | 0.128   | X hors limite |
| 36      | 97.3  | 1.27    | 0.127   | X hors limite |
| 37      | 100   | 1.27    | 0.127   | X hors limite |



## PARTIE IV

**Synthèse comparative des scénarios**

*Tableau récapitulatif et courbes de comparaison des cinq scénarios : évolution du débit, des pertes de charge et de la pression au dernier asperseur de la rampe critique en fonction de la topologie.*

## IV.1 Tableau comparatif des scénarios

| Scénario | Rampes | Q (L/min) | H_pompe (mCE) | ΔH nourrice (mCE) | P crit. dernier asp. (bar) | Asperseurs OK | PN4  |
|----------|--------|-----------|---------------|-------------------|----------------------------|---------------|------|
| Sc1      | 2      | 100       | 28.25         | 1.71              | 2.585 bar ✓                | ✓ OK          | ✓ OK |
| Sc2      | 3      | 150       | 27.38         | 3.23              | 2.339 bar ✓                | ✓ OK          | ✓ OK |
| Sc3      | 4      | 200       | 26.5          | 4.96              | 2.071 bar ✓                | ✓ OK          | ✓ OK |
| Sc4      | 1      | 60        | 28.95         | 0.6               | 2.687 bar ✓                | ✓ OK          | ✓ OK |
| Sc5      | 1      | 185       | 26.76         | 3.04              | 0.238 bar ✗                | ✗ hors limite | ✓ OK |

| Scénario | ΔH aspiration (mCE) | ΔH filtre (mCE) | ΔH nourrice totale (mCE) | ΔH rampe critique (mCE) | Marge / seuil 1.5 bar (%) |
|----------|---------------------|-----------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Sc1      | 0.043               | 0               | 1.602                    | 0.643                   | +72.3 %                   |
| Sc2      | 0.095               | 0               | 2.904                    | 0.643                   | +55.9 %                   |
| Sc3      | 0.167               | 0               | 4.19                     | 0.643                   | +38.1 %                   |
| Sc4      | 0.016               | 0               | 0.605                    | 1.455                   | +79.1 %                   |
| Sc5      | 0.143               | 0               | 3.031                    | 21.188                  | +−84.1 %                  |

### IV.1.1 Courbes comparatives

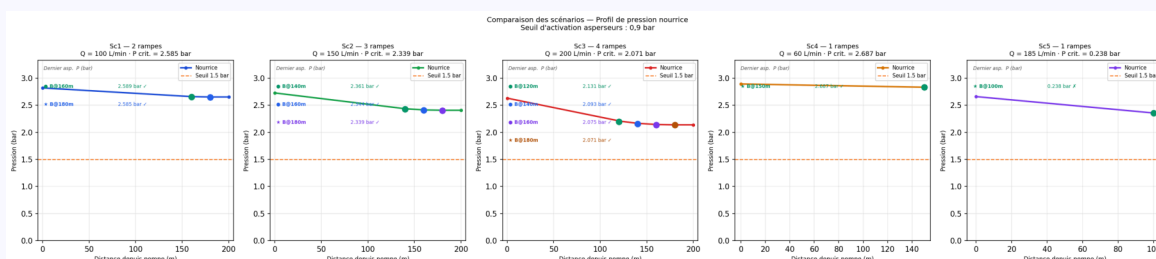
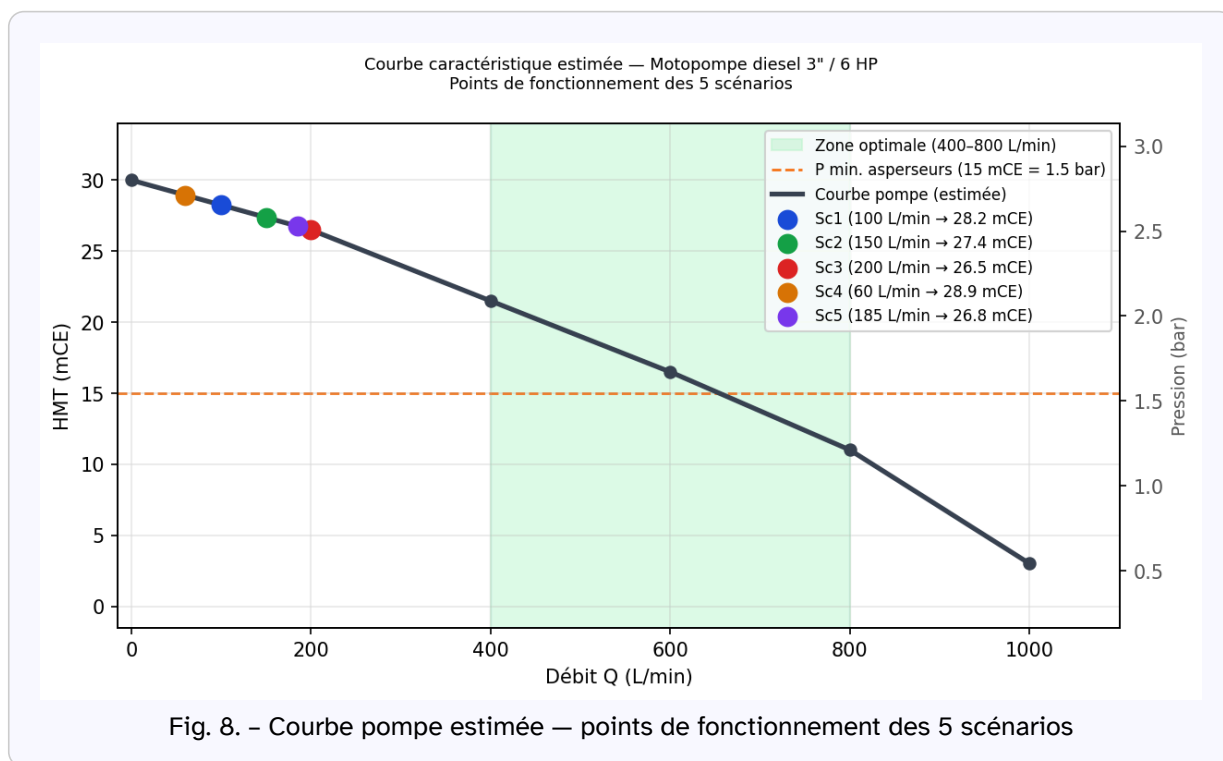


Fig. 7. – Comparaison des profils de pression nourrice — Sc1, Sc2, Sc3, Sc4, Sc5 · La ligne orange est le seuil d'activation des asperseurs (1.5 bar)



## IV.2 Analyse et conclusions

### Effets de l'ajout de rampes :

- Chaque rampe ajoutée augmente le débit de  $5 \times 10 = 50$  L/min.
- La perte de charge dans la nourrice (tronçon  $\emptyset \rightarrow$  premier té) croît en  $Q^2$  : doubler le débit quadruple les pertes.
- La pompe recule sur sa courbe ( $Q \uparrow \rightarrow H \downarrow$ ), ce qui réduit doublement la pression disponible.
- Les asperseurs autorégulants maintiennent un débit constant : la pression **résiduelle** chute, mais le débit unitaire reste stable tant que le seuil est dépassé.

### Marges de pression au dernier asperseur (chemin critique) :

- **Sc1** : 2.585 bar (marge +72 % / seuil)
- **Sc2** : 2.339 bar (marge +56 % / seuil)
- **Sc3** : 2.071 bar (marge +38 % / seuil)
- **Sc4** : 2.687 bar (marge +79 % / seuil)
- **Sc5** : 0.238 bar (X INSUFFISANT)

Seuls Sc1, Sc2, Sc3, Sc4 sont fonctionnels. Les autres dépassent les capacités de la pompe.

Ces dynamiques expliquent les verdicts observés dans le tableau comparatif et permettent de hiérarchiser les configurations :

### Conclusion — Configuration DN63, sans filtre :

- **Sc1 — 2 rampes DN32 — B1@160m, B2@180m — sans filtre** : P résiduelle = **2.585 bar** — ✓ **fonctionnel** (marge +72 % / seuil)
- **Sc2 — 3 rampes DN32 — B3@140m, B1@160m, B2@180m — sans filtre** : P résiduelle = **2.339 bar** — ✓ **fonctionnel** (marge +56 % / seuil)
- **Sc3 — 4 rampes DN32 — B4@120m, B3@140m, B1@160m, B2@180m — sans filtre** : P résiduelle = **2.071 bar** — ✓ **fonctionnel** (marge +38 % / seuil)

- **Sc4 — 1 rampe DN32 × 50 m (12 asp.) — nourrice 150 m — sans filtre — union direct : P**  
résiduelle = **2.687 bar** — ✓ **fonctionnel** (marge +79 % / seuil)
- **Sc5 — 1 rampe DN32 × 100 m (37 asp.) — nourrice 100 m — sans filtre — union direct : P**  
résiduelle = **0.238 bar** — ✗ **insuffisant** (seuil 1.5 bar)

**Scénarios fonctionnels :** Sc1, Sc2, Sc3, Sc4. Les configurations plus exigeantes dépassent encore la capacité disponible — réduire le nombre de rampes ou la longueur de nourrice.

#### Rappel historique — pourquoi la nourrice DN32 ne fonctionnait pas :

Campagne précédente (nourrice 50 m DN32, 1 rampe × 50 m, 15 asp.) :  $\Delta H$  nourrice  $\approx 5,3$  mCE  $\rightarrow$  H résiduelle  $\approx 12$  mCE = 1,2 bar ✓. Ce réseau court fonctionnait parce que la nourrice était courte.

Avec une nourrice DN32 × 200 m et plusieurs rampes : les pertes de charge Darcy-Weisbach (proportionnelles à  $L \times Q^2$ ) excèdent la HMT disponible. La nourrice DN63 ( $\varnothing$  int. 55.4 mm) résout ce problème — les pertes nourrice chutent d'un facteur  $(30/55.4)^4 \approx 0.09$  à débit égal.

## ANNEXE

# Données d'entrée et guide de modification

*Comment modifier les paramètres de calcul : éditer config.json, relancer just all. Contenu des données d'entrée et du script de calcul Python pour référence et reproductibilité.*

## A.1 Pipeline de calcul

### Flux de données :

1. Éditer `config.json` — paramètres physiques (pompe, nourrice, asperseurs...) et scénarios (`scenario_definitions`)
2. Lancer `just note NT_P1_hydraulique-irrigation` (depuis `documentation/`) — exécute `NT_P1_hydraulique-irrigation_calc.py`, compile la note Typst, injecte les métadonnées PDF
3. Le script Python écrit les résultats dans `config.json` (`scenarios`, `results`) et exporte `config_inputs.json` (données d'entrée seules)
4. La note Typst lit `config.json` et génère automatiquement tous les tableaux, graphiques et textes

**Règle d'or :** ne jamais modifier `config.json` manuellement dans les clés `scenarios` ou `results` — elles sont écrasées à chaque `just all`. Seules les clés de paramètres physiques et `scenario_definitions` sont à éditer.

### A.1.1 Ajouter ou modifier un scénario

Dans `config.json`, clé `scenario_definitions`, ajouter ou modifier un objet :

```
1 {
2   "id": "Sc6",
3   "label": "Description lisible du scénario",
4   "color": "#0891b2",
5   "branch_positions_m": [100, 150],
6   "overrides": {
7     "nourrice_inner_mm": 60,
8     "nourrice_outer_mm": 63,
9     "reduction_K": 0.10,
10    "branch_length_m": 50,
11    "branch_num_sprinklers": 10,
12    "no_filter": true,
13    "connection_k": 0.05,
14    "no_balancing_valve": true
15  }
16 }
```

**Overrides disponibles :** `no_filter` · `nourrice_length_m` · `nourrice_inner_mm` · `nourrice_outer_mm` · `nourrice_roughness_mm` · `reduction_K` · `branch_inner_mm` · `branch_length_m` · `branch_num_sprinklers` · `connection_k` · `no_balancing_valve`

Les champs absents de `overrides` utilisent la valeur globale du JSON (pompe, nourrice par défaut, filtre...). Un `overrides` vide `\{\}` utilise tous les paramètres globaux.

## A.2 Données d'entrée — config\_inputs.json

Fichier généré automatiquement par le script Python à chaque `just all.` à ne pas éditer.  
Contient tous les paramètres physiques et les définitions de scénarios, sans les résultats calculés.

```
1  {
2      "pump": {
3          "max_flow_lpm": 1000,
4          "pressure_mce": 30,
5          "outlet_diameter_mm": 80,
6          "max_suction_mce": 6,
7          "note": "Blackstone BD8000ES/AgriEuro"
8      },
9      "pump_curve": {
10         "note": "Courbe estimée – motopompe diesel centrifuge auto-amorçante 3\"/6HP",
11         "source": "Estimation d'après pompes diesel 80 mm / 6 HP similaires",
12         "optimal_range_lpm": [
13             400,
14             800
15         ],
16         "points": [
17             {
18                 "Q_lpm": 0,
19                 "H_mce": 30.0,
20                 "P_bar": 3.0
21             },
22             {
23                 "Q_lpm": 200,
24                 "H_mce": 26.5,
25                 "P_bar": 2.65
26             },
27             {
28                 "Q_lpm": 400,
29                 "H_mce": 21.5,
30                 "P_bar": 2.15
31             },
32             {
33                 "Q_lpm": 600,
34                 "H_mce": 16.5,
35                 "P_bar": 1.65
36             },
37             {
38                 "Q_lpm": 800,
39                 "H_mce": 11.0,
40                 "P_bar": 1.1
41             },
42             {
43                 "Q_lpm": 1000,
44                 "H_mce": 3.0,
45                 "P_bar": 0.3
46             }
47         ]
48     },
49     "aspiration": {
50         "material": "PVC annelé SN4",
51         "outer_diameter_mm": 73,
52         "inner_diameter_mm": 63,
53         "length_m": 5,
54         "roughness_mm": 0.5,
55         "note": "Inner diam. estimé à 63 mm (annelé 3\" SN4)"
56     },
57     "pump_outlet_reduction": {
58         "type": "Réduction conique courte DN80-DN63",
59         "inlet_diameter_mm": 80,
60         "outlet_diameter_mm": 63,
61         "K": 0.25,
62         "note": "Coeff. perte contraction conique – rapport sections (63/80)²≈0,64 → K≈0,25"
63     },
64 }
```

```

64     "filter": {
65         "type": "Filtre à tamis 1\½ plastique",
66         "finesse_microns": 130,
67         "inner_diameter_mm": 40,
68         "max_flow_lpm": 233,
69         "max_pressure_bar": 6,
70         "note": "Courbe pdc tabulée – eau propre MES<20 mg/L (filtre nettoyé)",
71         "pdc_table_clean": [
72             {
73                 "Q_lpm": 83,
74                 "pdc_bar": 0.075
75             },
76             {
77                 "Q_lpm": 133,
78                 "pdc_bar": 0.15
79             },
80             {
81                 "Q_lpm": 167,
82                 "pdc_bar": 0.225
83             },
84             {
85                 "Q_lpm": 200,
86                 "pdc_bar": 0.35
87             },
88             {
89                 "Q_lpm": 233,
90                 "pdc_bar": 0.475
91             }
92         ],
93         "pdc_table_dirty": [
94             {
95                 "Q_lpm": 83,
96                 "pdc_bar": 0.2
97             },
98             {
99                 "Q_lpm": 133,
100                "pdc_bar": 0.325
101            },
102            {
103                "Q_lpm": 167,
104                "pdc_bar": 0.5
105            },
106            {
107                "Q_lpm": 200,
108                "pdc_bar": 0.75
109            },
110            {
111                "Q_lpm": 233,
112                "pdc_bar": 1.1
113            }
114        ]
115    },
116    "nourrice": {
117        "material": "PEHD PN6 (SDR≈17)",
118        "outer_diameter_mm": 63,
119        "inner_diameter_mm": 55.4,
120        "total_length_m": 200,
121        "roughness_mm": 0.01,
122        "pn_rating_bar": 6,
123        "note": "PN6 SDR17 – épaisseur 3,8 mm – 63/3,8≈16,6 – 0,675 kg/m – couronne 100 m ≈ 67,5 kg"
124    },
125    "branches": [
126        {
127            "id": "B1",
128            "position_m": 160,
129            "inner_diameter_mm": 30,
130            "length_m": 30,
131            "num_sprinklers": 10,
132            "has_balancing_valve": true,
133            "note": "Rampe 1 – Té DN32 + vanne 1/4 tour + 10 asp. + bouchon"

```



```

134     },
135     {
136         "id": "B2",
137         "position_m": 180,
138         "inner_diameter_mm": 30,
139         "length_m": 30,
140         "num_sprinklers": 10,
141         "has_balancing_valve": true,
142         "note": "Rampe 2 – identique B1 (chemin critique : plus éloignée)"
143     }
144 ],
145 "sprinklers": {
146     "type": "Autorégulant",
147     "flow_lpm_unit": 5.0,
148     "min_activation_pressure_bar": 1.5,
149     "min_activation_pressure_mce": 15,
150     "note": "Débit constant 5 L/min dès P >= 1,5 bar – jets courts sous 1,5 bar"
151 },
152 "tee": {
153     "K_direct": 0.3,
154     "K_lateral": 1.3
155 },
156 "balancing_valve": {
157     "K_open": 0.5,
158     "type": "Vanne à bille 1/4 tour DN50"
159 },
160 "fluid": {
161     "kinematic_viscosity_m2s": 1.004e-06
162 },
163 "scenario_definitions": [
164     {
165         "id": "Sc1",
166         "label": "2 rampes DN32 – B1@160m, B2@180m – sans filtre",
167         "color": "#1d4ed8",
168         "branch_positions_m": [
169             160,
170             180
171         ],
172         "overrides": {
173             "no_filter": true
174         }
175     },
176     {
177         "id": "Sc2",
178         "label": "3 rampes DN32 – B3@140m, B1@160m, B2@180m – sans filtre",
179         "color": "#16a34a",
180         "branch_positions_m": [
181             140,
182             160,
183             180
184         ],
185         "overrides": {
186             "no_filter": true
187         }
188     },
189     {
190         "id": "Sc3",
191         "label": "4 rampes DN32 – B4@120m, B3@140m, B1@160m, B2@180m – sans filtre",
192         "color": "#dc2626",
193         "branch_positions_m": [
194             120,
195             140,
196             160,
197             180
198         ],
199         "overrides": {
200             "no_filter": true
201         }
202     },
203     {

```

```

204     "id": "Sc4",
205     "label": "1 rampe DN32 × 50 m (12 asp.) – nourrice 150 m – sans filtre – union direct",
206     "color": "#d97706",
207     "branch_positions_m": [
208         150
209     ],
210     "overrides": {
211         "no_filter": true,
212         "nourrice_length_m": 150,
213         "branch_inner_mm": 30,
214         "branch_length_m": 50,
215         "branch_num_sprinklers": 12,
216         "connection_k": 0.05,
217         "no_balancing_valve": true
218     }
219 },
220 {
221     "id": "Sc5",
222     "label": "1 rampe DN32 × 100 m (37 asp.) – nourrice 100 m – sans filtre – union direct",
223     "color": "#7c3aed",
224     "branch_positions_m": [
225         100
226     ],
227     "overrides": {
228         "no_filter": true,
229         "nourrice_length_m": 100,
230         "branch_inner_mm": 30,
231         "branch_length_m": 100,
232         "branch_num_sprinklers": 37,
233         "connection_k": 0.05,
234         "no_balancing_valve": true
235     }
236 }
237 ]
238 }

```

## A.3 Script de calcul — NT\_P1\_hydraulique-irrigation\_calc.py

**Focus sur les parties « calcul » du script Python.** Les fonctions graphiques (matplotlib) sont omises.

- Grâce à des « tags » ajoutés en commentaires dans le script, il est possible de n'extraire que certaines parties du code dans ce document, selon le principe des sections annotées `tag::name[] / end::name[]` (convention AsciiDoc).
- Les numéros de ligne indiqués dans les extraits correspondent au script original, avant extraction — ils peuvent différer dans ce document selon les sections extraites.

### A.3.1 Hydraulique de base — Darcy-Weisbach, Colebrook-White, Christiansen

```

25 def friction_factor(re, eps_d):
26     if re < 2300:
27         return 64.0 / re
28     f = 0.25 / (math.log10(eps_d / 3.7 + 5.74 / re**0.9))**2
29     for _ in range(10):
30         f = 1.0 / (-2.0 * math.log10(eps_d / 3.7 + 2.51 / (re * math.sqrt(f))))**2
31     return f
32
33 def hf_lin(q, d, l, eps, nu):
34     """Perte linéaire Darcy-Weisbach. Retourne (hf, v, Re, lambda)."""
35     if q <= 0 or l <= 0 or d <= 0:
36         return 0.0, 0.0, 0, 0.0
37     a = math.pi * d**2 / 4
38     v = q / a
39     re = v * d / nu
40     f = friction_factor(re, eps / d)

```

Python

```
41 hf = f * (l / d) * v**2 / (2.0 * 9.81)
42 return hf, v, re, f
43
44 def hs_sing(v, k):
45     return k * v**2 / (2.0 * 9.81)
46
47 def christiansen_F(N):
48     return (N + 1) * (2 * N + 1) / (6 * N * N)
```

## A.3.2 Interpolation courbe pompe

```
54 def pump_H(q_lpm, points):
55     qs = [p["Q_lpm"] for p in points]
56     hs = [p["H_mce"] for p in points]
57     if q_lpm <= qs[0]: return hs[0]
58     if q_lpm >= qs[-1]: return hs[-1]
59     for i in range(len(qs) - 1):
60         if qs[i] <= q_lpm <= qs[i + 1]:
61             t = (q_lpm - qs[i]) / (qs[i + 1] - qs[i])
62             return hs[i] + t * (hs[i + 1] - hs[i])
63     return hs[-1]
```

## A.3.3 Filtre à tamis

```
69 def filter_pdc(q_lpm, table):
70     qs = [p["Q_lpm"] for p in table]
71     pdcs = [p["pdc_bar"] for p in table]
72     if q_lpm <= qs[0]: return pdcs[0]
73     if q_lpm >= qs[-1]: return pdcs[-1]
74     for i in range(len(qs) - 1):
75         if qs[i] <= q_lpm <= qs[i + 1]:
76             t = (q_lpm - qs[i]) / (qs[i + 1] - qs[i])
77             return pdcs[i] + t * (pdcs[i + 1] - pdcs[i])
78     return pdcs[-1]
```

## A.3.4 Calcul réseau générique N branches

```
84 def compute_network_generic(cfg, branch_positions_m, overrides=None):
85     """
86     Calcul en régime établi pour N branches identiques positionnées le long de la nourrice.
87     branch_positions_m : liste de positions triées par ordre croissant.
88     La branche la plus éloignée (dernière) est le chemin critique.
89     overrides (tous optionnels) :
90     no_filter, branch_inner_mm, branch_length_m, branch_num_sprinklers,
91     connection_k (K raccordement branche critique), no_balancing_valve,
92     nourrice_length_m, nourrice_inner_mm, nourrice_outer_mm,
93     reduction_K (remplace cfg.pump_outlet_reduction.K).
94     """
95     if overrides is None:
96         overrides = {}
97     no_filter = overrides.get("no_filter", False)
98     conn_k = overrides.get("connection_k", None) # None → utiliser tee K_lateral
99     no_valve = overrides.get("no_balancing_valve", False)
100     nourrice_len = overrides.get("nourrice_length_m", cfg["nourrice"]["total_length_m"])
101
102     nu = cfg["fluid"]["kinematic_viscosity_m2s"]
103     spr = cfg["sprinklers"]
104     tee = cfg["tee"]
105     K_vo = 0.0 if no_valve else cfg["balancing_valve"]["K_open"]
106     d_n = overrides.get("nourrice_inner_mm", cfg["nourrice"]["inner_diameter_mm"]) / 1000.0
107     eps_n = overrides.get("nourrice_roughness_mm", cfg["nourrice"]["roughness_mm"]) / 1000.0
108
109     # Toutes les branches sont identiques (d, L, N_spr)
110     d_br = overrides.get("branch_inner_mm", cfg["branches"][0]["inner_diameter_mm"]) / 1000.0
111     N_br = overrides.get("branch_num_sprinklers", cfg["branches"][0]["num_sprinklers"])
112     L_br = overrides.get("branch_length_m", cfg["branches"][0]["length_m"])
113
114     n_br = len(branch_positions_m)
115     Q_per_br = N_br * spr["flow_lpm_unit"] / 60000.0
```

```

116 Q_total_lpm = n_br * N_br * spr["flow_lpm_unit"]
117 Q_total     = Q_total_lpm / 60000.0
118
119 # — Pompe
120 H_pump = pump_H(Q_total_lpm, cfg["pump_curve"]["points"])
121
122 # — Aspiration
123 d_asp  = cfg["aspiration"]["inner_diameter_mm"] / 1000.0
124 eps_asp = cfg["aspiration"]["roughness_mm"] / 1000.0
125 hf_asp, v_asp, _, _ = hf_lin(Q_total, d_asp, cfg["aspiration"]["length_m"], eps_asp, nu)
126
127 # — Réduction DN80-DN_nourrice
128 red_K  = overrides.get("reduction_K", cfg["pump_outlet_reduction"]["K"])
129 v_n_full = Q_total / (math.pi * d_n**2 / 4)
130 h_red   = hs_sing(v_n_full, red_K)
131
132 # — Filtre (optionnel – no_filter=True pour topologie sans filtre)
133 if no_filter:
134     h_filt_bar = 0.0
135     h_filt_mce = 0.0
136 else:
137     h_filt_bar = filter_pdc(Q_total_lpm, cfg["filter"]["pdc_table_clean"])
138     h_filt_mce = h_filt_bar * 10.0
139
140 H_start = H_pump - hf_asp - h_red - h_filt_mce
141
142 # — Vanne et rampe (identiques pour toutes les branches)
143 A_br  = math.pi * d_br**2 / 4
144 v_br_in = Q_per_br / A_br
145 hs_vanne = hs_sing(v_br_in, K_vo)
146
147 F_cr  = christiansen_F(N_br)
148 hf_br_full, v_br, _, _ = hf_lin(Q_per_br, d_br, L_br, eps_n, nu)
149 hf_rampe = F_cr * hf_br_full
150
151 # — Traversée nourrice – stocke H juste AVANT chaque té (chemin critique = direct partout sauf le dernier)
152 H_before_tee = [] # (H_mce, v_seg) juste avant le té
153 H_cur       = H_start
154 prev_pos    = 0.0
155
156 for i, pos in enumerate(branch_positions_m):
157     Q_seg = (n_br - i) * Q_per_br
158     L_seg = pos - prev_pos
159     hf_seg, v_seg, re_seg, lam_seg = hf_lin(Q_seg, d_n, L_seg, eps_n, nu)
160     H_cur -= hf_seg
161     H_before_tee.append({
162         "H_mce": H_cur,
163         "v_ms": v_seg,
164         "Q_lpm": Q_seg * 60000,
165         "L_seg": L_seg,
166         "from_m": prev_pos,
167         "pos_m": pos,
168         "hf_mce": hf_seg,
169         "re": round(re_seg),
170         "lam": lam_seg,
171     })
172     if i < n_br - 1:
173         H_cur -= hs_sing(v_seg, tee["K_direct"])
174     prev_pos = pos
175
176 # — Pression en entrée de chaque rampe
177 branches_results = []
178 for i, pos in enumerate(branch_positions_m):
179     bt  = H_before_tee[i]
180     k_conn = conn_k if conn_k is not None else tee["K_lateral"]
181     hs_tl = hs_sing(bt["v_ms"], k_conn)
182     H_in  = bt["H_mce"] - hs_tl - hs_vanne
183     H_last = H_in - hf_rampe
184     branches_results.append({
185         "position_m": pos,
186         "H_inlet_mce": round(H_in, 2),
187         "H_inlet_bar": round(H_in / 10.0, 3),
188         "H_last_mce": round(H_last, 2),
189         "H_last_bar": round(H_last / 10.0, 3),
190         "sprinklers_ok": H_last >= spr["min_activation_pressure_mce"],
191         "hs_tee_lat_mce": round(hs_tl, 3),

```

```

192     })
193
194     # Chemin critique = dernière branche (plus éloignée)
195     crit = branches_results[-1]
196     bt_crit = H_before_tee[-1]
197     H_last_crit = crit["H_last_mce"]
198
199     # Profil asperseur par asperseur – rampe critique
200     q_spr = spr["flow_lpm_unit"] / 60000.0
201     spacing_br = L_br / N_br
202     rampe_profile = []
203     P_cur = crit["H_inlet_mce"]
204     Q_seg_br = Q_per_br
205     for i in range(N_br):
206         hf_seg_br, _, _ = hf_lin(Q_seg_br, d_br, spacing_br, eps_n, nu)
207         P_after = P_cur - hf_seg_br
208         rampe_profile.append({
209             "asp_num": i + 1,
210             "x_m": round((i + 1) * spacing_br, 1),
211             "P_mce": round(P_after, 2),
212             "P_bar": round(P_after / 10.0, 3),
213             "active": P_after >= spr["min_activation_pressure_mce"],
214         })
215         P_cur = P_after
216         Q_seg_br -= q_spr
217
218     # Équilibrage vannes non-critiques
219     balancing = []
220     for i in range(n_br - 1):
221         delta = max(0.0, branches_results[i]["H_last_mce"] - H_last_crit)
222         K_req = delta * 2.0 * 9.81 / v_br_in**2 if v_br_in > 0 else 0.0
223         balancing.append({
224             "position_m": branch_positions_m[i],
225             "delta_mce": round(delta, 3),
226             "K_required": round(K_req, 2),
227         })
228
229     # Profil nourrice pour le graphique
230     nourrice_profile = [{"x_m": 0.0, "P_mce": round(H_start, 2)}]
231     H_tmp = H_start
232     prev = 0.0
233     for i, pos in enumerate(branch_positions_m):
234         bt = H_before_tee[i]
235         nourrice_profile.append({"x_m": pos, "P_mce": round(bt["H_mce"], 2)})
236         if i < n_br - 1:
237             H_after_dir = bt["H_mce"] - hs_sing(bt["v_ms"], tee["K_direct"])
238             nourrice_profile.append({"x_m": pos, "P_mce": round(H_after_dir, 2)})
239             H_tmp = H_after_dir
240             prev = pos
241     # Bout de nourrice (longueur effective – bouchée ou fin de réseau)
242     nourrice_profile.append({"x_m": nourrice_len, "P_mce": round(H_before_tee[-1]["H_mce"], 2)})
243
244     r = lambda x, n=3: round(x, n)
245     pn_bar = cfg["nourrice"]["pn_rating_bar"]
246
247     # Segments pour tableau détaillé Typst
248     segments_detail = []
249     H_tmp2 = H_start
250     for i, pos in enumerate(branch_positions_m):
251         bt = H_before_tee[i]
252         is_last = (i == n_br - 1)
253         if is_last:
254             k_seg = conn_k if conn_k is not None else tee["K_lateral"]
255             tee_lbl = "Raccord union direct" if conn_k is not None else f"Té T{int(pos)} – latéral (chemin critique)"
256         else:
257             k_seg = tee["K_direct"]
258             tee_lbl = f"Té T{int(pos)} – direct"
259         hs_tee_path = hs_sing(bt["v_ms"], k_seg)
260         segments_detail.append({
261             "seg_label": f"Nourrice {int(bt['from_m'])}→{int(pos)} m",
262             "L_m": int(bt["L_seg"]),
263             "Q_lpm": round(bt["Q_lpm"], 1),
264             "v_ms": round(bt["v_ms"], 3),
265             "hf_mce": round(bt["hf_mce"], 3),
266             "tee_label": tee_lbl,
267             "tee_K": round(k_seg, 2),

```

```

268     "hs_tee_mce": round(hs_tee_path, 3),
269 })
270
271 return {
272     # — Métadonnées topologie (pour rendu conditionnel Typst)
273     "has_filter": not no_filter,
274     "connection_type": "union" if conn_k is not None else "tee",
275     "connection_k": round(conn_k if conn_k is not None else tee["K_lateral"], 3),
276     "nourrice_display_length_m": nourrice_len,
277     "nourrice_inner_mm": round(d_n * 1000),
278     "nourrice_outer_mm": overrides.get("nourrice_outer_mm", cfg["nourrice"]["outer_diameter_mm"]),
279     "reduction_K_used": round(red_K, 3),
280     "nourrice_plugged": conn_k is None,
281     "branch_length_m": L_br,
282     "branch_inner_mm": round(d_br * 1000),
283     "branch_num_sprinklers": N_br,
284     "Q_per_branch_lpm": N_br * spr["flow_lpm_unit"],
285     # — Résultats
286     "Q_total_lpm": Q_total_lpm,
287     "N_total_sprinklers": n_br * N_br,
288     "n_branches": n_br,
289     "H_pump_mce": r(H_pump, 2),
290     "hf_aspiration_mce": r(hf_asp, 3),
291     "v_aspiration_ms": r(v_asp, 3),
292     "h_reduction_mce": r(h_red, 3),
293     "v_nourrice_full_ms": r(v_n_full, 3),
294     "h_filter_clean_bar": r(h_filt_bar, 3),
295     "h_filter_mce": r(h_filt_mce, 2),
296     "H_start_mce": r(H_start, 2),
297     "hs_vanne_mce": r(hs_vanne, 3),
298     "v_branch_inlet_ms": r(v_br_in, 3),
299     "christiansen_F": r(F_cr, 3),
300     "hf_rampe_mce": r(hf_rampe, 3),
301     "hf_rampe_full_mce": r(hf_br_full, 3),
302     "v_branch_ms": r(v_br, 3),
303     "H_last_critical_mce": r(H_last_crit, 2),
304     "H_last_critical_bar": r(H_last_crit / 10.0, 3),
305     "critical_ok": H_last_crit >= spr["min_activation_pressure_mce"],
306     "branches_results": branches_results,
307     "balancing": balancing,
308     "segments_detail": segments_detail,
309     "rampe_critical_profile": rampe_profile,
310     "nourrice_profile": nourrice_profile,
311     "max_pressure_bar": r(H_pump / 10.0, 2),
312     "pn_rating_bar": pn_bar,
313     "pn4_ok": H_pump / 10.0 <= pn_bar,
314     "safety_margin_pn4_pct": r((pn_bar - H_pump / 10.0) / pn_bar * 100.0, 1),
315     # Compatibilité Sc1 (pour les parties existantes du .typ)
316     "H_last_B2_mce": r(branches_results[-1]["H_last_mce"], 2),
317     "H_last_B2_bar": r(branches_results[-1]["H_last_bar"], 3),
318     "H_last_B1_mce": r(branches_results[-2]["H_last_mce"] if n_br >= 2 else 0, 2),
319     "H_last_B1_bar": r(branches_results[-2]["H_last_bar"] if n_br >= 2 else 0, 3),
320     "B2_sprinklers_ok": branches_results[-1]["sprinklers_ok"],
321     "B1_sprinklers_ok": branches_results[-2]["sprinklers_ok"] if n_br >= 2 else True,
322     "H_B1_inlet_mce": r(branches_results[-2]["H_inlet_mce"] if n_br >= 2 else 0, 2),
323     "H_B2_inlet_mce": r(branches_results[-1]["H_inlet_mce"], 2),
324     "delta_h_valve_B1_mce": balancing[-1]["delta_mce"] if balancing else 0,
325     "K_valve_B1_required": balancing[-1]["K_required"] if balancing else 0,
326     "rampe_b2_profile": rampe_profile,
327     # Champs Sc1 nourrice (segments 1 et 2 pour compat)
328     "hf_nourrice_1_mce": r(H_before_tee[0]["hf_mce"], 3),
329     "v_nourrice_1_ms": r(H_before_tee[0]["v_ms"], 3),
330     "H_before_T1_mce": r(H_before_tee[0]["H_mce"], 2),
331     "hs_T1_direct_mce": r(hs_sing(H_before_tee[0]["v_ms"], tee["K_direct"])) if n_br >= 2 else 0, 3),
332     "hs_T1_lateral_mce": r(hs_sing(H_before_tee[0]["v_ms"], tee["K_lateral"])) if n_br >= 2 else 0, 3),
333     "hf_nourrice_2_mce": r(H_before_tee[-1]["hf_mce"], 3) if n_br >= 2 else 0,
334     "v_nourrice_2_ms": r(H_before_tee[-1]["v_ms"], 3) if n_br >= 2 else 0,
335     "H_before_T2_mce": r(H_before_tee[-1]["H_mce"], 2) if n_br >= 2 else 0,
336     "hs_T2_lateral_mce": r(hs_sing(H_before_tee[-1]["v_ms"], tee["K_lateral"])) if n_br >= 2 else 0, 3),
337     "re_nourrice_1": H_before_tee[0]["re"],
338     "lambda_nourrice_1": r(H_before_tee[0]["lam"], 5),
339 }

```

## A.3.5 Volume et temps de remplissage

```
345 def compute_fill_time(cfg, n_branches, overrides=None):
346     if overrides is None:
347         overrides = {}
348     d_n = overrides.get("nourrice_inner_mm", cfg["nourrice"]["inner_diameter_mm"]) / 1000.0
349     d_br = overrides.get("branch_inner_mm", cfg["branches"][0]["inner_diameter_mm"]) / 1000.0
350     d_asp = cfg["aspiration"]["inner_diameter_mm"] / 1000.0
351     nourrice_len = overrides.get("nourrice_length_m", cfg["nourrice"]["total_length_m"])
352     branch_len = overrides.get("branch_length_m", cfg["branches"][0]["length_m"])
353     V_n = math.pi * d_n**2 / 4 * nourrice_len * 1000
354     V_br = math.pi * d_br**2 / 4 * branch_len * n_branches * 1000
355     V_asp = math.pi * d_asp**2 / 4 * cfg["aspiration"]["length_m"] * 1000
356     V_tot = V_n + V_br + V_asp
357     Q_fill = min(200.0, cfg["filter"]["max_flow_lpm"] * 0.85)
358     T_min = V_tot / Q_fill
359     return {
360         "V_nourrice_L": round(V_n, 1),
361         "V_branches_L": round(V_br, 1),
362         "V_aspiration_L": round(V_asp, 1),
363         "V_total_L": round(V_tot, 1),
364         "Q_fill_lpm": round(Q_fill, 0),
365         "T_fill_min": round(T_min, 1),
366         "T_fill_s": round(T_min * 60, 0),
367     }
```

## A.3.6 Boucle principale — lecture scénarios et écriture résultats

```
593 # Chemins résolus depuis l'emplacement du script : la recette `just note` s'exécute
594 # depuis documentation/, pas depuis le dossier de la note.
595 BASE_DIR = os.path.dirname(os.path.abspath(__file__))
596 CONFIG = os.path.join(BASE_DIR, "config.json")
597 CONFIG_IN = os.path.join(BASE_DIR, "config_inputs.json")
598 CHART_DIR = os.path.join(BASE_DIR, "..", "..", "..", "..", "images")
599 FIG_PREFIX = "nt_pl_hydraulique_fig_"
600
601 with open(CONFIG, "r", encoding="utf-8") as fh:
602     cfg = json.load(fh)
603
604 # — Définition des scénarios - lue depuis config.json / "scenario_definitions"
605 SCENARIOS_DEF = cfg["scenario_definitions"]
606
607 print(f"\n{'='*66}")
608 print("  CALCUL MULTI-SCÉNARIOS")
609 print(f"{'='*66}")
610
611 scenarios_out = []
612 for sc_def in SCENARIOS_DEF:
613     print(f"\n  {sc_def['id']} - {sc_def['label']}")
614     print(f"    {'='*60}")
615     ov = sc_def.get("overrides", {})
616     res = compute_network_generic(cfg, sc_def["branch_positions_m"], overrides=ov)
617     fill = compute_fill_time(cfg, len(sc_def["branch_positions_m"]), overrides=ov)
618
619     Q = res["Q_total_lpm"]
620     ok = "✓ OK" if res["critical_ok"] else "x INSUFFISANT"
621     ok_pn = "✓" if res["pn4_ok"] else "x"
622     print(f"      Q total      : {Q:.1f} L/min ({res['N_total_sprinklers']} asp.)")
623     print(f"      H pompe      : {res['H_pump_mce']:.2f} mCE = {res['H_pump_mce']/10:.3f} bar")
624     print(f"      P crit. B@{sc_def['branch_positions_m'][-1]}m : {res['H_last_critical_mce']:.2f} mCE = {res['H_last_critical_bar']:.3f} bar {ok}")
625     print(f"      PN4          : P_max={res['max_pressure_bar']:.2f} bar {ok_pn}")
626     for br in res["branches_results"]:
627         s = "✓" if br["sprinklers_ok"] else "x"
628         print(f"      B@{br['position_m']:3d}m : inlet={br['H_inlet_bar']:.3f}b · last_asp={br['H_last_bar']:.3f}b {s}")
629
630     scenarios_out.append({
631         "id": sc_def["id"],
632         "label": sc_def["label"],
```

```

633         "color":          sc_def.get("color", "#888888"),
634         "branch_positions_m": sc_def["branch_positions_m"],
635         "results":         res,
636         "fill_time":       fill,
637     })
638
639 # — Graphiques
640 chart_dir = CHART_DIR
641
642 print(f"\n{' '*66}")
643 print("  GÉNÉRATION DES GRAPHIQUES")
644 print(f"{' '*66}")
645
646 ok_charts = generate_pump_curve(cfg, scenarios_out, chart_dir)
647 if ok_charts:
648     print("  ✓ courbe_pompe.png")
649
650 for sc in scenarios_out:
651     ok = generate_pressure_profile(cfg, sc, chart_dir)
652     if ok:
653         print(f"  ✓ profil_pression_{sc['id'].lower()}.png")
654
655 ok_cmp = generate_comparison_chart(cfg, scenarios_out, chart_dir)
656 if ok_cmp:
657     print("  ✓ comparaison_scenarios.png")
658
659 # — Écriture config.json
660 # Maintenir compat : cfg.results.steady_state = Sc1
661 cfg["results"] = {
662     "steady_state": scenarios_out[0]["results"],
663     "fill_time":    scenarios_out[0]["fill_time"],
664     "charts_ok":    ok_charts,
665 }
666 cfg["scenarios"] = scenarios_out
667
668 with open(CONFIG, "w", encoding="utf-8") as fh:
669     json.dump(cfg, fh, indent=4, ensure_ascii=False)
670
671 # — Export données d'entrée seules (sans résultats calculés)
672 COMPUTED_KEYS = {"results", "scenarios"}
673 cfg_inputs = {k: v for k, v in cfg.items() if k not in COMPUTED_KEYS}
674 with open(CONFIG_IN, "w", encoding="utf-8") as fh:
675     json.dump(cfg_inputs, fh, indent=4, ensure_ascii=False)
676
677 print(f"\n{' '*66}")
678 print("  Résultats écrits dans config.json")
679 print("  Données d'entrée exportées dans config_inputs.json")
680 print(f"{' '*66}\n")

```

## A.4 En pratique : installation du réseau d'irrigation

### A.4.1 Nourrice DN63 — déroulage et tirage

Deux couronnes de 100 m (PEHD PN6 (SDR≈17) DN63, Ø int. 55.4 mm, épaisseur 3,8 mm). Masse par couronne ≈ **67.5 kg** (0,675 kg/m × 100 m) — manutention à **une** personne. La première couronne a été déroulée sur place puis tractée sur 100 m avec le fourgon (trop de frottements sur le sol à vaincre pour une seule personne).

Des couronnes de 50 m auraient été plus maniables, au prix de manchons de jonction ( 19 € pièce x 2 U = 38 €).





Fig. 9. - Couronnes DN63 avant déroulage



Fig. 10. - Déroulage de la première couronne



Fig. 11. - Traction de la nourrice avec le fourgon



Fig. 12. - Détail du nœud d'attache pour traction



## A.4.2 Raccordement des Tés DN63

En DN63, les tés à compression ne s'emboîtent pas à la main comme en DN32 : il faut bloquer la canalisation, lubrifier à la graisse et forcer l'emboîtement.



Fig. 13. – Blocage de la canalisation pour emboîtement du té



Fig. 14. – Té DN63 emboîté — vue rapprochée

## A.4.3 Raccordement d'une rampe : té, vanne d'équilibrage, asperseurs

Chaque rampe se pique sur la nourrice par un té à compression DN63 à dérivation DN32 (Ø int. 30 mm), immédiatement suivi d'une **vanne quart de tour** : c'est elle qui permet l'équilibrage décrit plus haut — étrangler les rampes proches de la pompe pour que la plus éloignée reçoive sa part. Sans cette vanne, la première rampe capte l'essentiel du débit.





Fig. 15. – Té DN63 en place sur la nourrice, dérivation vers la rampe et vanne quart de tour d'équilibrage en tête



Fig. 16. – Le même té avant mise en place — la dérivation reçoit la rampe DN32

Les asperseurs se posent ensuite sur la rampe de 30 m, au pas régulier qu'impose leur nombre (10 unités, soit un tous les 3 m) : c'est l'espacement retenu dans tous les calculs de cette note, via le facteur de Christiansen. Tout écart à cet équidistance rend le facteur inexact — mieux vaut poser au décimètre qu'à l'estime.

## A.5 Références et méthodes

### A.5.1 Méthodes de calcul

- **Darcy-Weisbach** — perte de charge linéaire en conduite. La formulation retenue,  $\Delta H = \lambda \left( \frac{L}{D} \right) \frac{v^2}{2g}$ , est celle de tous les manuels d'hydraulique en charge ; elle est valable quel que soit le régime, contrairement aux formules empiriques (Hazen-Williams, Chézy) calées sur un domaine étroit.
- **Colebrook-White** — coefficient de frottement  $\lambda$  en régime turbulent, résolu ici par itérations successives à partir de l'initialisation de Swamee-Jain (fonction `friction_factor` du script). Sous  $Re = 2300$ , on bascule sur la loi de Poiseuille  $\lambda = 64/Re$ .
- **Christiansen** — facteur de réduction  $F$  appliqué à la perte de charge d'une rampe à **prises multiples équidistantes** : le débit décroît de prise en prise, et la perte réelle vaut  $F$  fois celle d'une conduite parcourue par le débit d'entrée. Sans lui, une rampe de dix asperseurs serait surdimensionnée d'un facteur voisin de trois.
- **Interpolations linéaires** — courbe caractéristique de la pompe (H en fonction de Q) et perte de charge du filtre à tamis, toutes deux tabulées dans `config.json` et interpolées entre points de mesure. Aucune extrapolation hors des bornes : le script sature aux valeurs extrêmes.

## A.5.2 Matériel du réseau

- **Motopompe** — Blackstone BD 8000ES, diesel 6 ch, raccords 80 mm, auto-amorçante. La courbe utilisée est une **estimation** d'après des pompes 80 mm/6 ch comparables : c'est l'hypothèse la plus faible de la note, à confirmer par un relevé au manomètre sur la machine.
- **Nourrice** — PEHD **PN6** (SDR ~ 17) DN63, Ø int. 55,4 mm, épaisseur 3,8 mm, couronnes de 100 m (environ 67,5 kg pièce).
- **Rampes** — PEHD DN32 (Ø int. 30 mm), 30 m, dix asperseurs par rampe, té à compression DN63 et vanne quart de tour en tête.
- **Asperseurs autorégulants** — 5 L/min à débit constant dès 1,5 bar ; en dessous, le jet se raccourcit sans que le débit s'effondre — d'où le critère de vérification retenu au dernier asperseur de la rampe critique.
- **Filtre à tamis** 1"½, finesse 130 µm, débit maximal 233 L/min — courbe de perte de charge donnée **tamis propre** : un tamis encrassé change complètement le bilan, ce que le scénario « sans filtre » borne par l'autre extrémité.
- **Aspiration** — tuyau PVC annelé SN4 3", 5 m, crépine immergée avec clapet de pied.

## A.5.3 Liens internes

- **NT-P1-05 — « Télécommander une motopompe diesel par SMS »** (Canopée) : le boîtier qui démarre et arrête à distance la pompe dimensionnée ici. Les durées d'arrosage qu'il applique (commande TIMER) se déduisent des débits calculés dans cette note.
- **NT-P1-03 — « Cultiver le haricot sec en plein champ »** (Canopée) : la culture que ce réseau irrigue.
- **Guide d'usage de la motopompe** (Canopée) : la déclinaison « adhérents » — conduite sur site et commandes SMS, sans calcul ni électronique.