

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

Partie I — Contexte et objectifs	2
I.1 Contexte	3
I.1.1 La parcelle.....	3
I.1.2 Configuration du réseau — hypothèses communes.....	3
I.1.3 Scénarios étudiés.....	3
I.2 Objectifs	4
I.3 Équipements	4
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
Partie II — Sc1 — Calcul de référence détaillé	7
II.1 Principes hydrauliques	8
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
II.2 Résultats — régime établi	9
II.2.1 Bilan des pertes de charge — chemin critique (pompe → B2 → dernier asp.).....	9
II.2.2 Profil de pression.....	10
II.3 Vérification de tenue en pression — PN6	10
II.4 Équilibrage des rampes	11
II.5 Remplissage initial	11
II.6 Synthèse	12
Partie III — Scénarios alternatifs — explorations aux limites	13

III.1 Scénarios Sc2 à Sc5 – calculs détaillés.....	14
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
Partie IV – Synthèse comparative des scénarios	23
IV.1 Tableau comparatif des scénarios.....	24
IV.1.1 Courbes comparatives.....	24
IV.2 Analyse et conclusions.....	25
Annexe – Données d'entrée et guide de modification	27
A.1 Pipeline de calcul.....	28
A.1.1 Ajouter ou modifier un scénario.....	28
A.2 Données d'entrée – config_inputs.json.....	29
A.3 Script de calcul – calcul_hydraulique_param.py.....	32
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
A.4 En pratique : installation du réseau d'irrigation.....	38
A.4.1 Nourrice DN63 – déroulage et tirage.....	38
A.4.2 Raccordement des Tés DN63.....	40

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 x 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 contraignante¹ : 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 – bouchée à l'extrémité
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
Sc1	2	100	B@160 m, B@180 m
Sc2	3	150	B@140 m, B@160 m, B@180 m
Sc3	4	200	B@120 m, B@140 m, B@160 m, B@180 m
Sc4	1	60	B@150 m
Sc5	1	185	B@100 m

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

¹avec 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 ≥ 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 : $P_{\max \text{ pompe}} \leq \text{PN6}$ 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.	1000 L/min	Débit à refoulement libre — non atteint avec ce réseau
Pression max. (Q=0)	30 mCE	= 30 / 10.0 bar — à vide
Aspiration max.	6 mCE	Ne pas dépasser côté aspiration
Sortie pompe	DN80	3 pouces — réduit à DN63 par le raccord de sortie

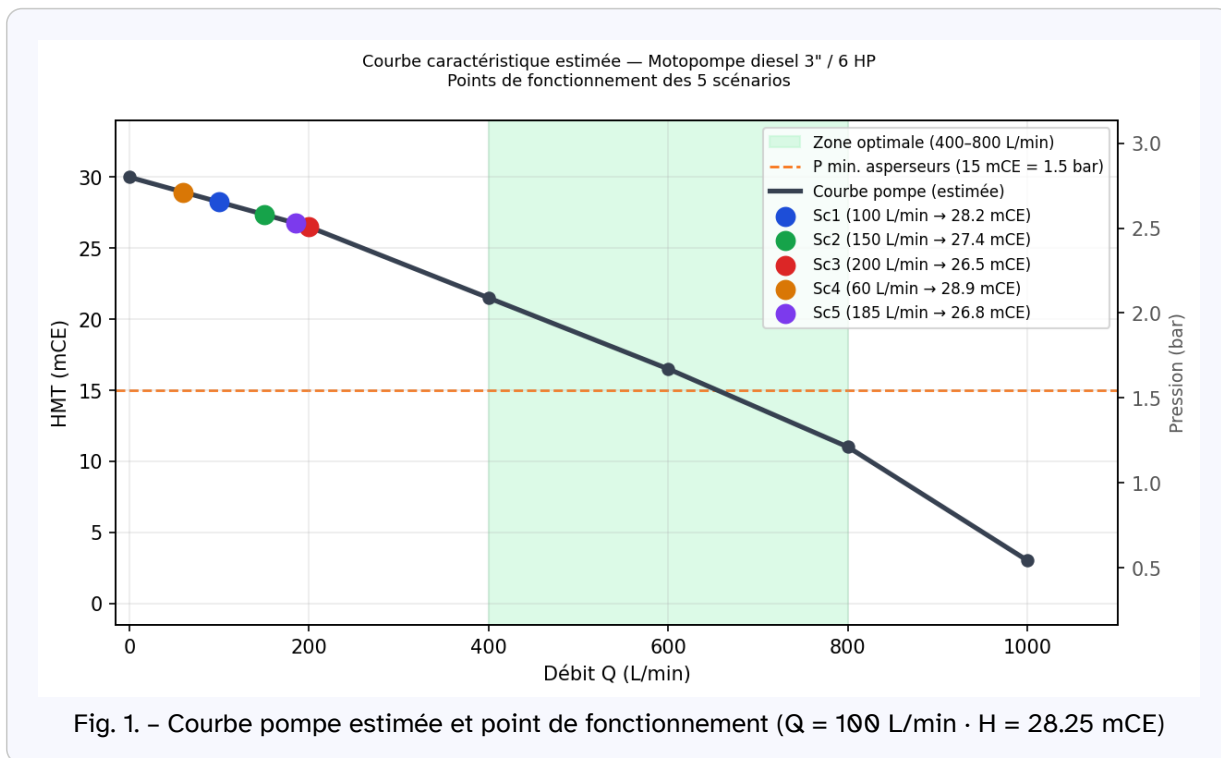
Note fabricant : en attente de la courbe débit/pression détaillée pour le modèle Blackstone BD8000ES/AgriEuro². La courbe a été estimée d'après des pompes centrifuges similaires — les résultats sont à confirmer à réception de la vraie courbe.

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

²en 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	Filtre à tamis 1"½ plastique	Non installé – pour référence
Finesse	130 µm	Retient sable et particules > 0.13 mm
Ø intérieur	40 mm	Connexions DN32 – incompatible DN63
Débit max.	233 L/min	
Pression max.	6 bar	

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 – bouchée au bout

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 — chemin critique

I.3.4 Asperseurs

Paramètre	Valeur	Note
Type	Autorégulant	Débit constant quelle que soit la pression \geq seuil
Débit unitaire	5 L/min	Constant dès $P \geq 1.5$ bar
Seuil d'activation	1.5 bar (15 mCE)	En dessous : jets courts ou pas de jet
Nombre par rampe	10	2 rampes identiques
Total	20	Fonctionnement simultané
Débit réseau total	100 L/min	= 20 × 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 [REDACTED] 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 λ est calculé par l'équation de **Colebrook-White** (itération) :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{\Re \sqrt{\lambda}} \right)$$

avec $\Re = v \frac{D}{\nu}$ (régime turbulent, $Re > 10\,000$ 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 $Q = 100$ 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 $Q = 100$ L/min : $H_{\text{pompe}} = 28.25 \text{ mCE}$.

II.2 Résultats – régime établi

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

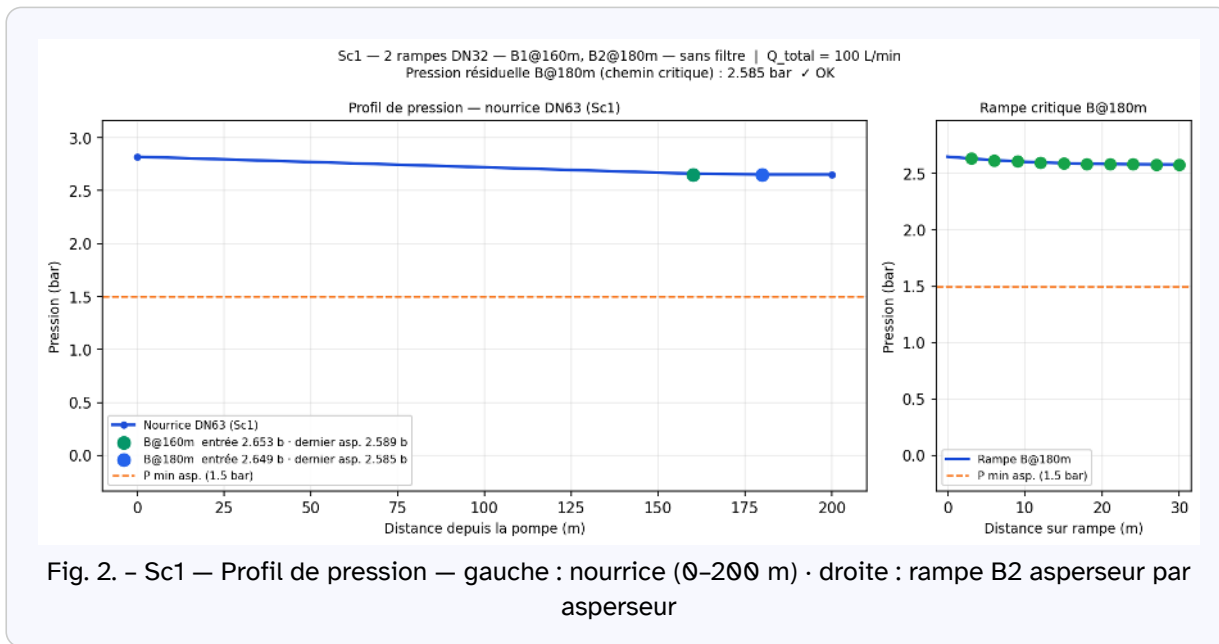
II.2.1 Bilan des pertes de charge – chemin critique (pompe \rightarrow B2 \rightarrow dernier asp.)

Poste	Perte (mCE)	Vitesse (m/s)
Aspiration PVC annelé 63 mm int. · 5 m	0.043	0.535
Réduction conique Réduction conique courte DN80 \rightarrow DN63 ($K = 0.25$)	0.006	—
Filtre supprimé (sans filtre)	0,00	—
Nourrice 55.4 mm int. · 180 m (pompe \rightarrow T1)	1.602	0.691
Té 1 – passage direct ($K = 0.3$)	0.007	—
Nourrice 55.4 mm int. · 20 m (T1 \rightarrow T2)	0.058	0.346
Té 2 – passage latéral ($K = 1.3$) – critical	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
H résiduelle au dernier asperseur B2	25.85 mCE = 2.585 bar ✓	

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

La pompe est **très surdimensionnée** pour ce réseau (Q consommé = 100 L/min vs. Q max pompe = 1000 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)	2.83 bar	PN6 = 6 bar	✓ OK
Marge de sécurité	52.9 %	—	

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
Volume total	540.1 L
Débit remplissage estimé (Q pompe à H basse ≈ 0)	198 L/min
Temps de remplissage	≈ 2.7 min (164 s)

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 ██████████ 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).

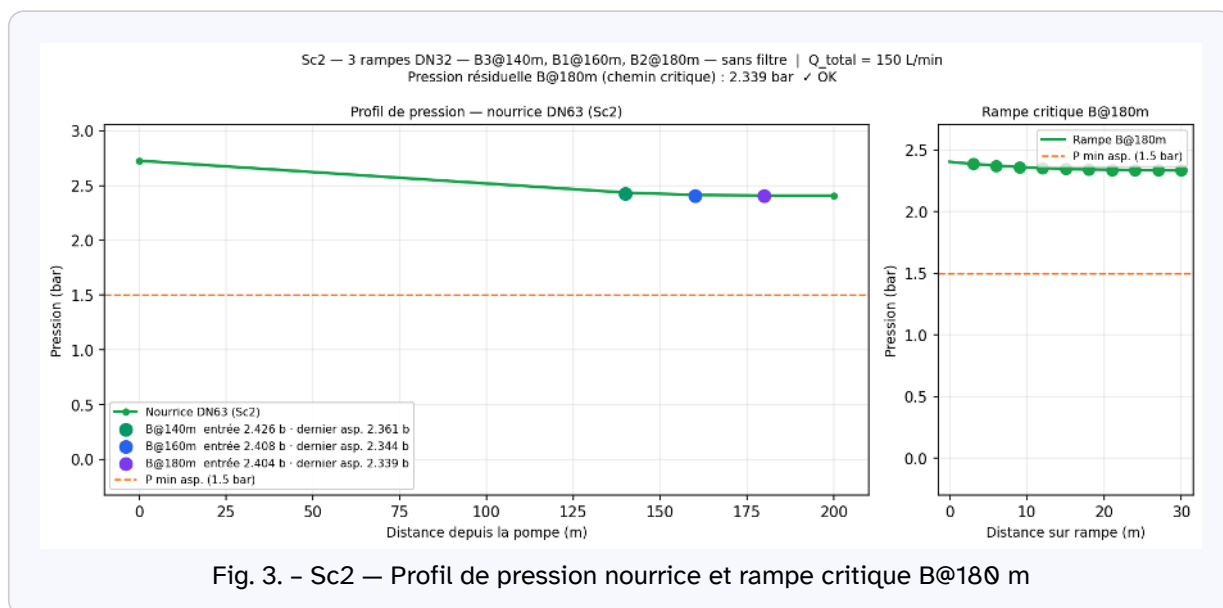
III.1.1.2 Bilan des pertes de charge – chemin critique (pompe → B@180 m → dernier asp.)

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	—
<i>Filtre supprimé (sans filtre)</i>	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
H résiduelle – dernier asp. rampe critique	23.39 mCE = 2.339 bar ✓	

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 ██████████ 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.)

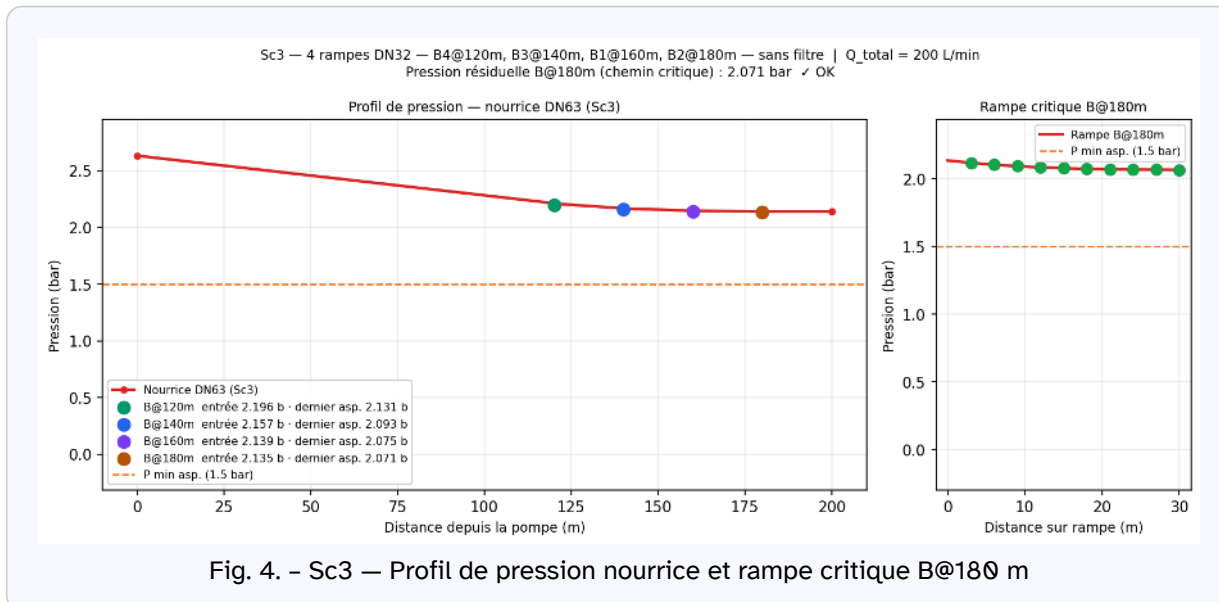
Poste	Perte (mCE)	Vitesse (m/s)
Aspiration PVC annelé 63 mm · 5 m	0.167	1.069
Réduction conique DN80→DN63 ($K = 0.25$)	0.024	—
<i>Filtre supprimé (sans filtre)</i>	0,00	—
Nourrice 0→120 m · Q = 200 L/min	4.19	1.383
Té T120 – direct ($K = 0.3$)	0.029	—
Nourrice 120→140 m · Q = 150 L/min	0.415	1.037
Té 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
H résiduelle – dernier asp. rampe critique	20.71 mCE = 2.071 bar ✓	

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).

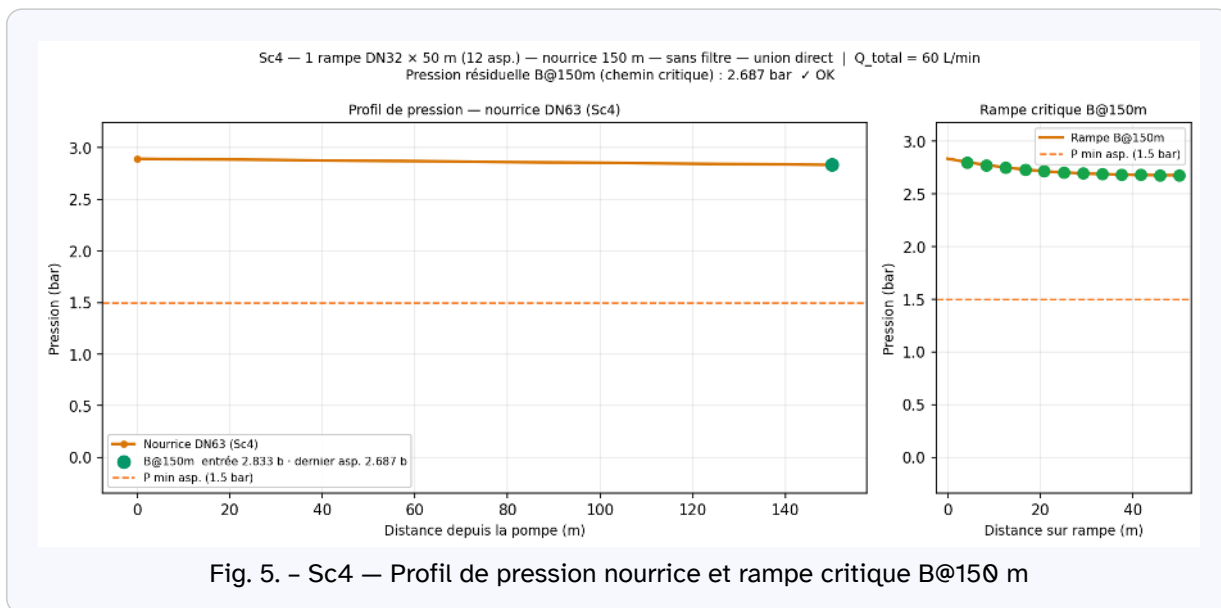
III.1.3.2 Bilan des pertes de charge – chemin critique (pompe → B@150 m → dernier asp.)

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
H résiduelle – dernier asp. rampe critique	26.87 mCE = 2.687 bar ✓	

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).

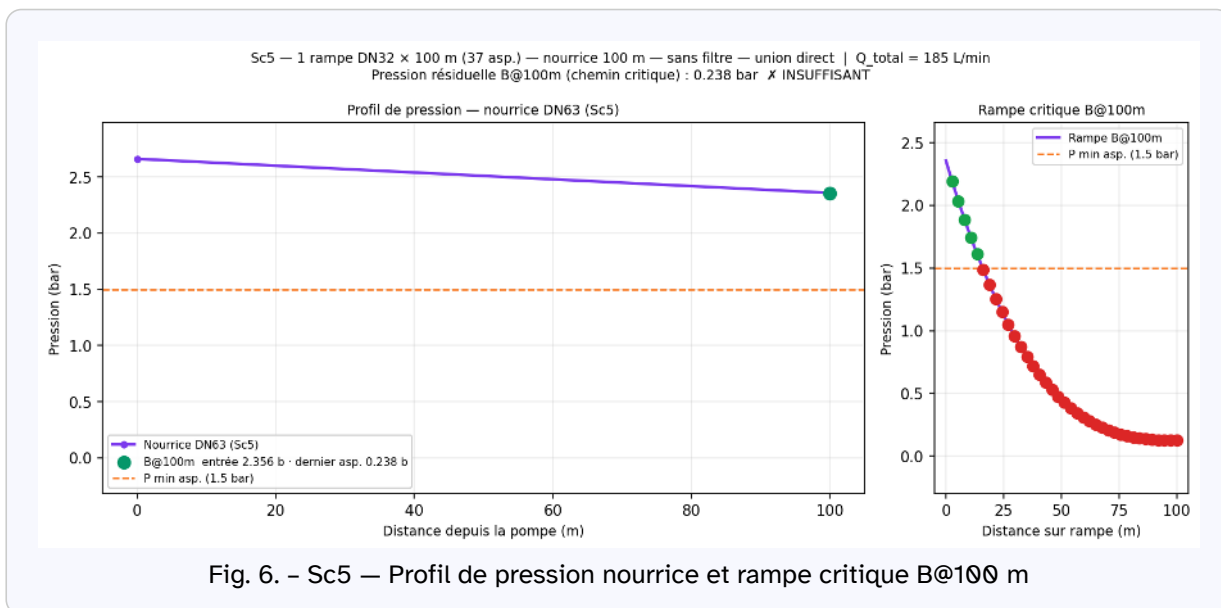
III.1.4.2 Bilan des pertes de charge – chemin critique (pompe → B@100 m → dernier asp.)

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
H résiduelle – dernier asp. rampe critique	2.38 mCE = 0.238 bar X	

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

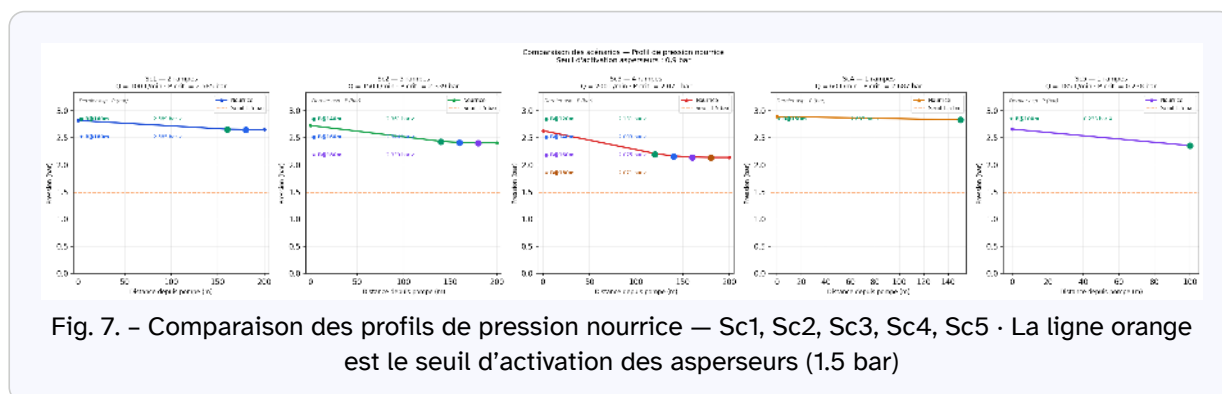
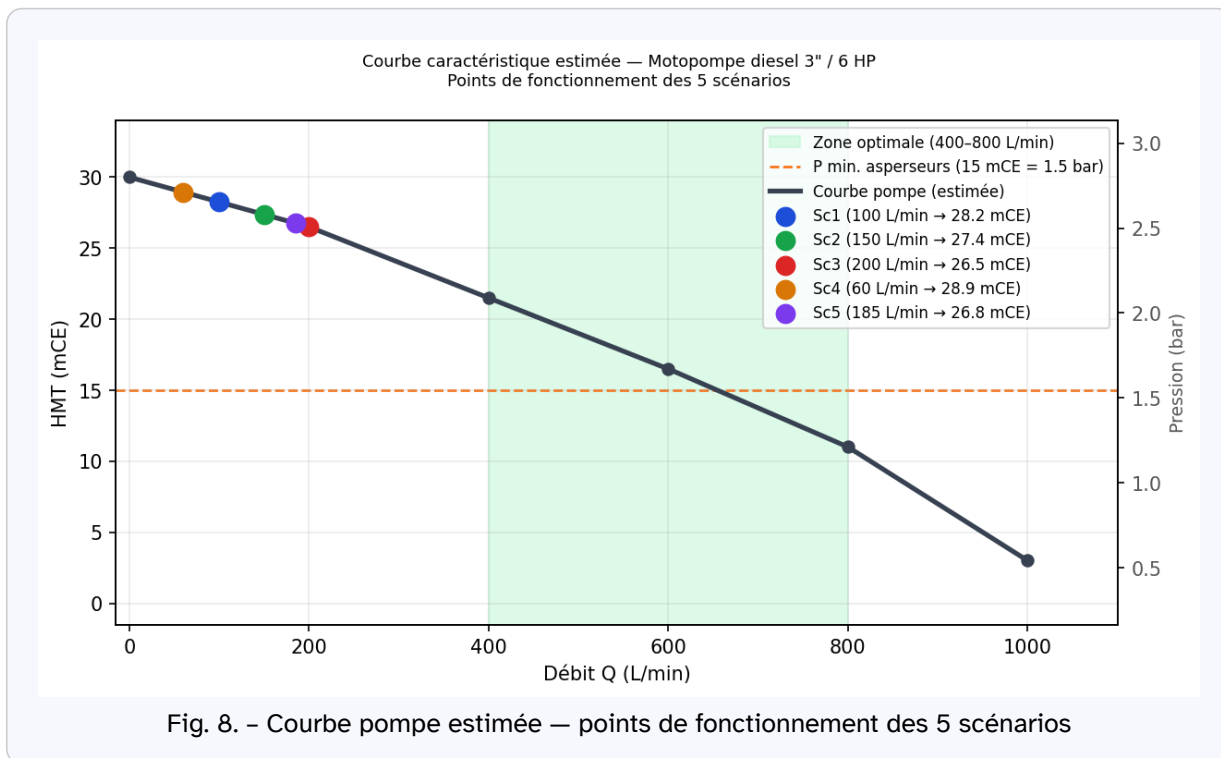


Fig. 7. – Comparaison des profils de pression nourrice – Sc1, Sc2, Sc3, Sc4, Sc5 · La ligne orange est le seuil d'activation des asperseurs (1.5 bar)



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.) : ΔH nourrice $\approx 5,3$ mCE \rightarrow H résiduelle ≈ 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 all` — exécute `calcul_hydraulique_param.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   "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 — calcul_hydraulique_param.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)

```

```

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): Python
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): Python
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): Python
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 with open("config.json", "r", encoding="utf-8") as fh:
594     cfg = json.load(fh)
595
596 # — Définition des scénarios - lue depuis config.json / "scenario_definitions"
597 SCENARIOS_DEF = cfg["scenario_definitions"]
598
599 print(f"\n{' '*66}")
600 print("  CALCUL MULTI-SCÉNARIOS")
601 print(f"\n{' '*66}")
602
603 scenarios_out = []
604 for sc_def in SCENARIOS_DEF:
605     print(f"\n {sc_def['id']} - {sc_def['label']}")
606     print(f"  {' '*60}")
607     ov = sc_def.get("overrides", {})
608     res = compute_network_generic(cfg, sc_def["branch_positions_m"], overrides=ov)
609     fill = compute_fill_time(cfg, len(sc_def["branch_positions_m"]), overrides=ov)
610
611     Q = res["Q_total_lpm"]
612     ok = "✓ OK" if res["critical_ok"] else "x INSUFFISANT"
613     ok_pn = "✓" if res["pn4_ok"] else "x"
614     print(f"    Q total      : {Q:.1f} L/min ({res['N_total_sprinklers']} asp.)")
615     print(f"    H_pompe      : {res['H_pump_mce']:.2f} mCE = {res['H_pump_mce']/10:.3f} bar")
616     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}")
617     print(f"    PN4          : P_max={res['max_pressure_bar']:.2f} bar {ok_pn}")
618     for br in res["branches_results"]:
619         s = "✓" if br["sprinklers_ok"] else "x"
620         print(f"        B@{br['position_m']:3d}m : inlet={br['H_inlet_bar']:.3f}b · last_asp={br['H_last_bar']:.3f}b {s}")
621
622     scenarios_out.append({
623         "id": sc_def["id"],
624         "label": sc_def["label"],
625         "color": sc_def.get("color", "#888888"),
626         "branch_positions_m": sc_def["branch_positions_m"],
627         "results": res,
628         "fill_time": fill,
629     })
630
631 # — Graphiques
632 chart_dir = "assets/images"

```

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

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