

IV.1. Introduction

Une préoccupation majeure des traiters et distributeurs d'eau est de répondre à la demande des consommateurs et d'assurer le maintien de la qualité de l'eau potable au cours de sa distribution, dans le but d'un respect des normes, et dans un souci de préservation de la santé publique.

La résistance des bactéries à ce milieu est due à leur organisation en biofilm, c'est à dire en micro colonies dispersées, situées à la surface des conduites d'adduction d'eau potable.

La présence de ce biofilm bactérien au sein des réseaux de distribution d'eau potable peut être à l'origine de non-conformité lors du décrochage de ces biomasses fixées et peut constituer un abri aux bactéries potentiellement pathogènes.

IV.2. Les Réseaux de distribution d'eau potable en tant que réacteur complexe :[8]

L'objectif premier de ces réseaux était l'acheminement de l'eau vers les consommateurs, afin de répondre en quantité suffisante et en tout point du réseau à leur demande. La gestion de ces réseaux a longtemps consisté en la gestion de simples outils de transport d'eau et les aspects quantitatifs étaient privilégiés par rapport aux aspects qualitatifs, entraînant ainsi des sur dimensionnements de réseaux.

En effet, un système de distribution d'eau potable ne doit pas être seulement considéré comme un système inerte, mais comme un réacteur complexe (figure IV.1), siège d'interactions physico-chimiques et biologiques.

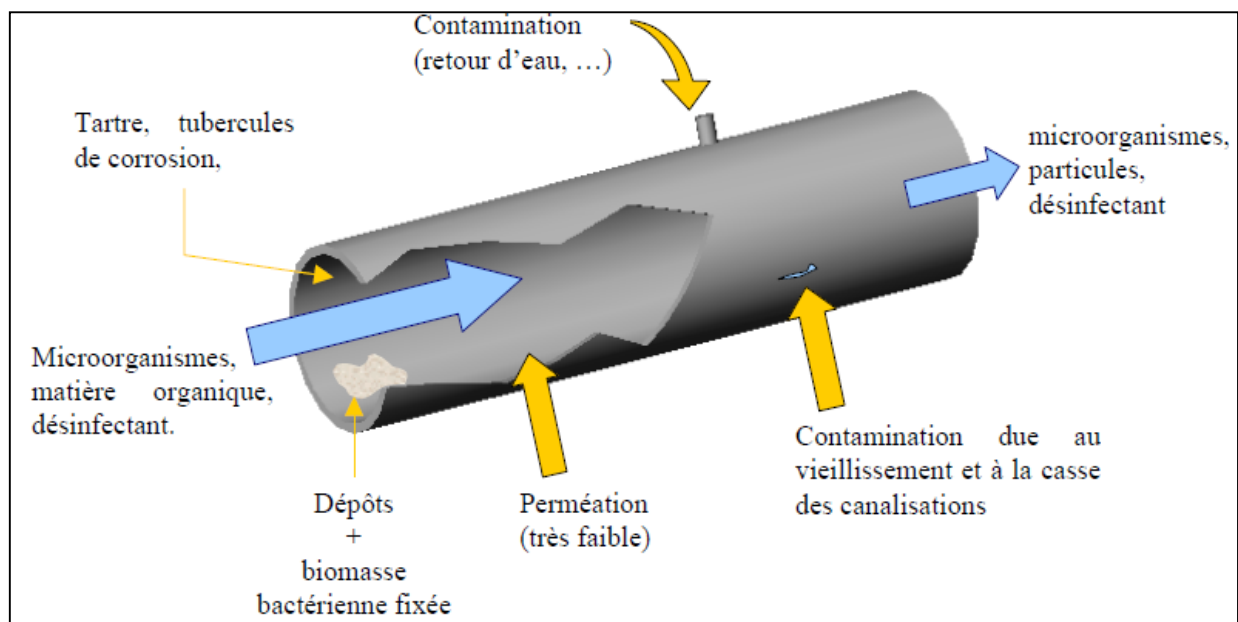


Figure IV. 1: Schéma d'un réseau réacteur[8].

Remarque : les travaux de réhabilitation sur réseaux ont pour but de limiter la formation de tubercules de corrosion, et un mauvais vieillissement des canalisations.

IV.3. Evolution de la qualité de l'eau le long d'un système de distribution d'eau potable :[8]

Des études réalisées sur des réseaux de distribution d'eau potable d'assez grande étendue, ont permis l'observation de variations de la qualité microbiologique des eaux transportées le long du système de distribution.

Ces variations sont visualisables sur la Figure IV. 2.

L'augmentation du temps de séjour de l'eau dans le réseau s'accompagne de celle de la densité bactérienne (sauf quand présence de postes de rechloration sur le réseau), traduisant une dynamique bactérienne. De cette dynamique résulte l'instabilité biologique de certains réseaux de distribution d'eau potable.

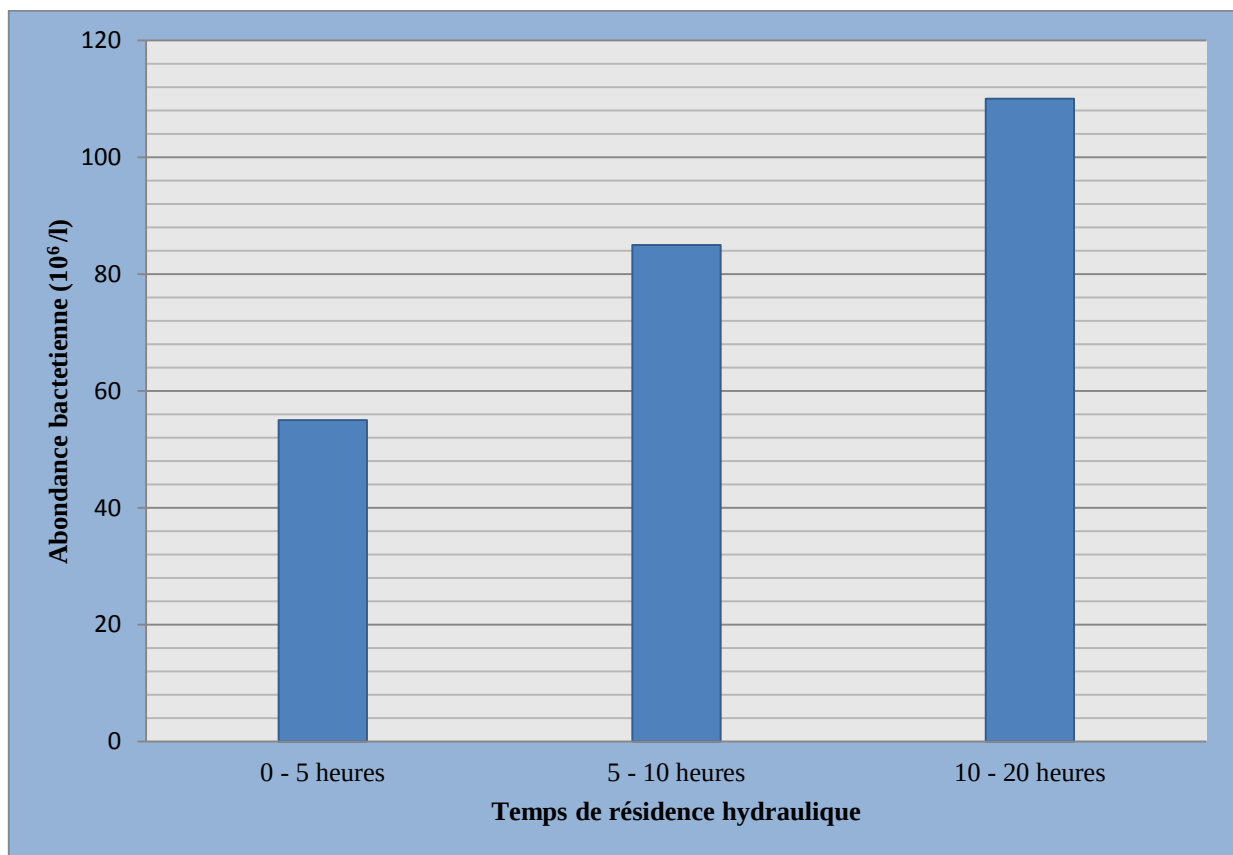


Figure IV. 3: Exemple de l'altération de la qualité microbiologique le long d'un système de Distribution d'eau potable.

Les biofilms correspondent à des associations de microorganismes inclus dans une matrice d'exopolymères, qui sont généralement attachées à la surface de toutes sortes de matériaux, tels que les métaux, les plastiques, les particules de sols, tissus, ...

Au niveau des réseaux de distribution d'eau potable, les biofilms consistent, le plus souvent, en une association de plusieurs espèces : bactéries, champignons, algues, protozoaires, contenues au sein de dépôts de débris particuliers et de produits de corrosion.

L'origine des bactéries dans les systèmes de distribution d'eau potable est souvent mal cernée :

- les réservoirs, où l'eau se trouve en contact avec l'air, et où les orifices, mal protégés, peuvent permettre le passage de poussières ou d'insectes apportant des contaminations,
- le temps de séjour de l'eau dans les réservoirs ou dans les canalisations, qui peut être plus ou moins important,
- des contaminations externes par retour d'eau et l'intervention sur les réseaux, tels que les travaux, la pose de nouvelles.

Une fois les bactéries circulant dans les canalisations, celles-ci s'agrègent et se multiplient sur la surface interne des canalisations : elles forment alors un biofilm. Des phénomènes d'arrachage de bactéries depuis le biofilm, développé sur les parois internes des canalisations, peuvent alors avoir lieu et être à l'origine de remise en solution de microorganismes, et donc de la contamination microbiologique du réseau.

Les conséquences de la présence d'un biofilm sont multiples et concernent aussi bien les populations bactériennes, que les caractéristiques physiques du réseau :

- les bactéries accumulées au niveau d'un biofilm constituent le premier maillon d'une chaîne alimentaire et ainsi favorisent le développement de macroorganismes,
- certains types bactériens peuvent induire, par leur présence ou leur activité métabolique, une augmentation de la turbidité, de la sapidité et de l'odeur de l'eau,
- certaines bactéries peuvent accélérer le phénomène de corrosion. Le terme de biocorrosion est alors utilisé,
- les capacités de distribution d'un réseau peuvent être diminuées par l'augmentation des forces de résistance, induites par la présence de biofilms,

Les différentes étapes de la formation, puis de l'évolution d'un biofilm, sont présentées sur la Figure IV. 4 ci-dessous.

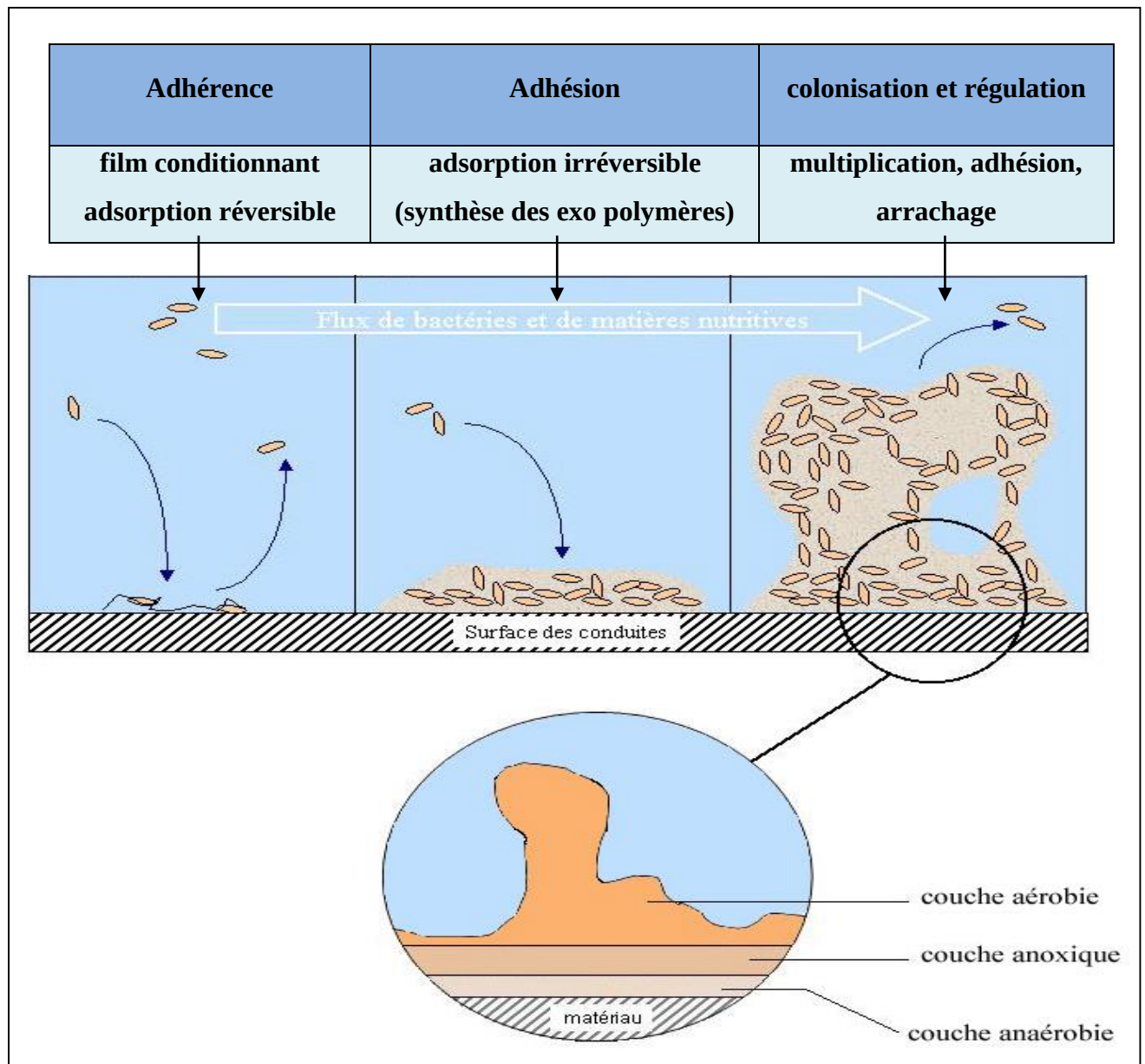


Figure IV. 5: Représentation schématique de la formation d'un biofilm dans d'un réseau de distribution.[8]

IV.4. Chloration de l'eau (eaux des forages)

- Eaux destinées à usage humain qui n'ont pas été chlorées à l'avance. C'est le cas des eaux qui arrivent de sources ou de puits et qui sont distribuées directement aux utilisateurs. La quantité du chlore serait utilisée pour désinfecter et pour maintenir un résiduel. La chloration serait effectuée dans le réservoir avec un système de recirculation pour la contrôler convenablement de façon que l'eau distribuée aux utilisateurs contienne en tout moment le résiduel nécessaire.
- Des eaux qui ont été chlorées auparavant mais que, à cause de la distance entre l'endroit de traitement et celui de distribution finale, ou à cause de possibles pertes de chlore après le procès de chloration, ne contiennent pas un chlore résiduel approprié au lieu plus éloigné du réseau de distribution.

IV.4.1. Chloration en réservoir avec recirculation :

Quand l'eau entre dans la cuve on effectue une chloration proportionnelle. À la sortie, s'il est nécessaire, on ferait un réglage (dose de rappel). Il se forme un circuit de recirculation, de telle façon qu'une partie de l'eau qui sort du réservoir est distribuée à la population et une autre partie retourne au réservoir. Ainsi on peut atteindre la valeur consigne pour tout le contenu du réservoir. La proportion d'eau circulée peut être choisie parmi le robinet-vanne qui contrôle la recirculation.

IV.4.2. Chloration en ligne :

La désinfection proprement dite a été déjà effectuée auparavant. C'est un cas de chloration de rappel pour maintenir le niveau de chlore résiduel nécessaire. Un exemple serait une station de chloration dans un réseau de distribution très étendu, où le traitement de désinfection a été effectué à une grande distance du point de consommation. Le schéma montré dans la figure ci-dessous (figure VI.4) est la configuration standard du KIT DE CHLORATION EN LIGNE

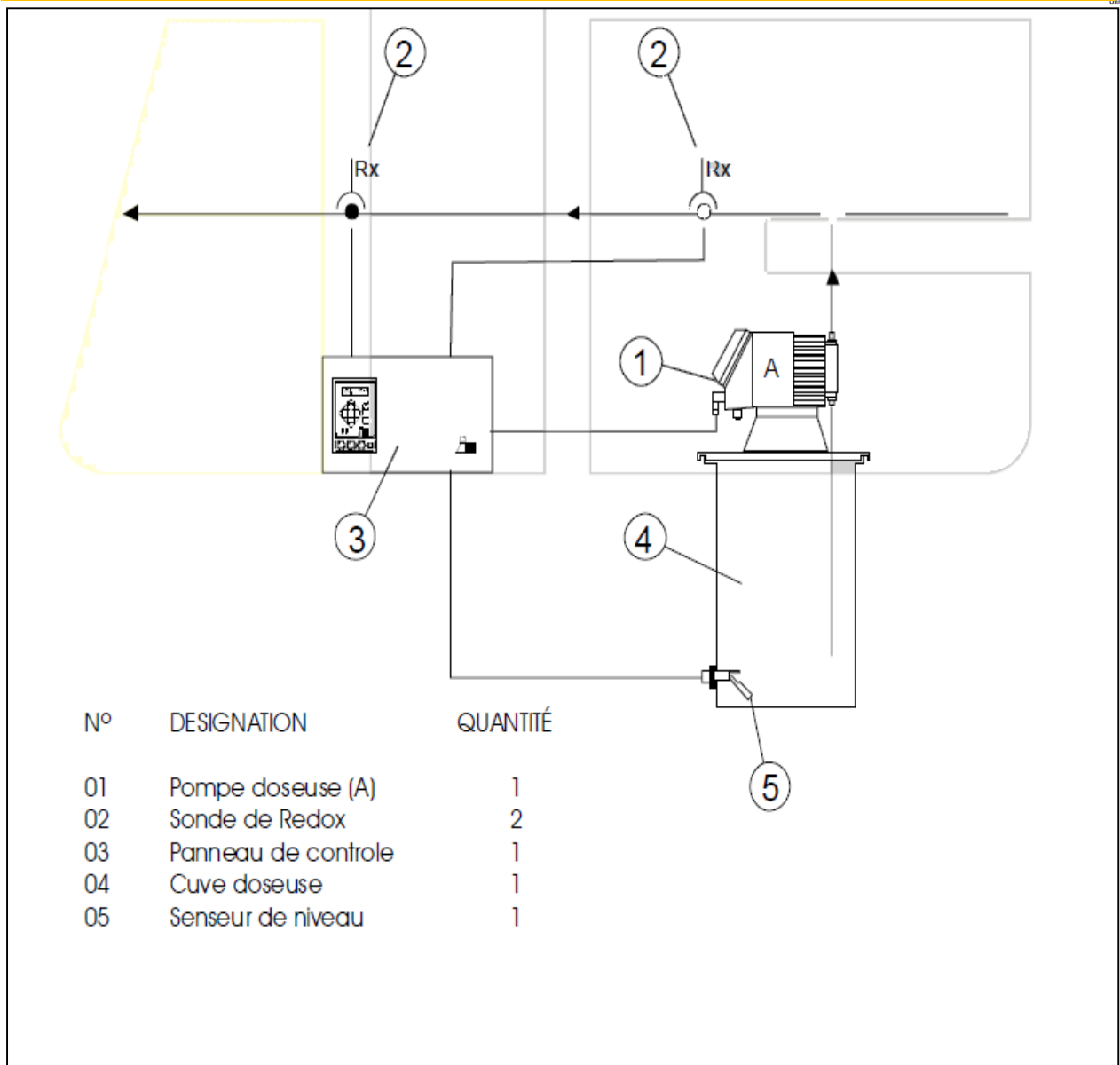


Figure IV. 6: Installation de chloration en ligne.

On peut affirmer sans l'ombre d'un doute que l'utilisation du chlore en faibles doses dans le traitement de l'eau potable a permis de sauver des millions de vies humaines dans le monde. Il est raisonnable de croire que si toute l'eau consommée par l'humanité était désinfectée au chlore, les taux de mortalité diminueraient d'une façon très importante dans les pays du tiers monde.

IV.5. Théorie de la cinétique chimique[9]

Dans la pratique, on rencontre des mélanges au niveau des réservoirs, des interconnexions, et des systèmes de ré chloration en ligne. Les paramètres influençant la dégradation du composé sont la température et l'origine des eaux. S'il peut exister localement des phénomènes de dégradation de la qualité du à une casse, il existe également des processus de dégradation durant le transport dans les canalisations.

IV.5.1. La cinétique des réactions

La cinétique des réactions peut être de l'ordre 0,1 ou 2.

$$C = K \cdot C_0^n$$

Avec :

- C : Concentration de l'espèce
- K : Constante de vitesse de dégradation de l'espèce
- C_0 : Concentration initiale de l'espèce.
- n : Ordre de la réaction (0, 1, 2).

Le coefficient K est fonction de la matière organique et inorganique contenue dans le volume d'eau et celles dues aux interactions avec le biofilm sur les parois des conduites ou avec le matériel des conduites lui-même. Le coefficient de dégradation totale du chlore k peut donc être estimé à l'aide du coefficient de dégradation dans la masse d'eau ou «Biomasse» K_b et sur les parois ou «Wall» K_w , le K_b est généralement évalué expérimentalement à l'aide du test en bêche. Ce test consiste à mesurer la concentration en chlore résiduel, à des intervalles de temps précis.

$$K = k_w + k_b$$

Avec K : coefficient de dégradation global (l/min)

K_b : coefficient de dégradation dans la masse d'eau (1/min)

K_w : coefficient de dégradation près de paroi (l/min)

La majorité des modèles publiés dans la littérature considère que la dégradation de chlore suit une cinétique de premier ordre.

Généralement les coefficients K_b et K_w sont en fonction de :

K_b : en fonction de (concentration des microorganismes, minéraux, (calcium, magnésium etc.).)

K_w : en fonction de (matière de conduite, diamètre de conduite, âge de conduite).

D'après l'étude de (AWWARF, 1996 ; Powell et al. 2000) [10] sur des réseaux de distribution le coefficient K_b et K_w varie entre

$$0,02 \leq K_b \leq 0,07$$

$$0,00 \leq K_w \leq 0,40$$

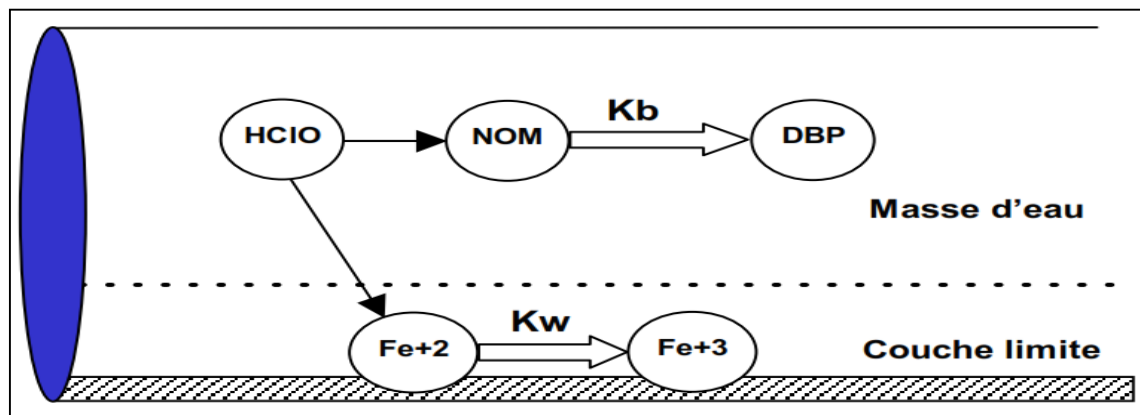


Figure IV. 7: Zones de réactions à l'intérieur d'un tuyau[10]

IV.6. La modélisation de la qualité de l'eau dans Epanet :

Le simulateur de la qualité de l'eau d'EPANET utilise une approximation lagrangienne pour suivre, à intervalles définis, ce qui se passe dans des portions d'eau discrètes, lorsqu'elles circulent dans les tuyaux et se mélangent aux nœuds de demande. Ces intervalles de calcul sont normalement beaucoup plus courts que les intervalles utilisés pour calculer le comportement hydraulique (par exemple, plutôt des minutes que des heures), parce que le temps de séjour de l'eau dans un tuyau peut être très court. Néanmoins, les résultats sont affichés uniquement pour les instants déterminés par l'utilisateur, tout comme dans le cas de l'analyse hydraulique.

En plus de la simulation hydraulique le logiciel Epanet peut modéliser la qualité de l'eau : on dispose ainsi de la capacité suivante :

- Modélisation le transport d'un traceur pendant la durée de la simulation
- Modélisation du temps du séjour de l'eau dans le réseau
- Modélisation le transport et la variation de concentration en plus ou en moins que subit une substance (par exemple du chlore résiduel).
- Introduction à chaque nœud de la proportion d'eau dans le réseau.
- Modélisation de la réaction d'évolution de la qualité de l'eau dans le réseau
- Indication à chaque nœud de la projection d'eau provenant d'une ressource distincte

- Modélisation de la réaction d'évolution de la qualité de l'eau dans la masse d'eau
- Utilisation des coefficients de vitesse de réaction globale et des coefficients spécifiques pour certains tuyaux.
- Etablissement d'une corrélation entre les coefficients de vitesse de réaction au niveau de la paroi en fonction de la rugosité des tuyaux.
- Introduction d'une substance quelconque à différents emplacements du réseau variant dans le temps en débit massique ou en concentration.
- Mélange d'eau dans les réservoirs : mélange parfait, à flux piston ou en deux compartiments.

En utilisant ces capacités, Epanet peut modéliser des phénomènes en rapport avec la qualité de l'eau comme :

- Le mélange d'eau provenant de différentes sources ;
- Le temps de l'eau dans le réseau (temps de séjour) ;
- Dégradation du chlore résiduel ;
- L'accroissement des sous-produits de la désinfection ;
- La diffusion d'un polluant dans le réseau, introduit dans certain point.

IV.7. Temps de Séjour[10]

Epanet peut modéliser le temps de séjour de l'eau dans le réseau de distribution. Il est le temps nécessaire pour un volume élémentaire d'eau traverse le plus long chemin du réseau. L'eau qui entre dans le réseau provenant des réservoirs sort à travers les nœuds de consommation les plus longs.

IV.8. Dégradation du chlore dans le réseau de distribution

La qualité d'eau fournie par un réseau d'eau potable dépend directement de sa concentration en chlore résiduel transporté par l'eau dans le réseau. Le chlore réagit avec les composantes de l'eau et en même temps avec le biofilm de paroi de la conduite. Pour modéliser la destruction du chlore par les deux voies, nous avons pris une approche linéaire dont ces coefficients sont estimés sous les hypothèses suivantes :

Pour notre étude on a pris ces coefficients (K_b , K_w) à l'ordre de

$$K_b = - 0,50$$

Pour les raisons suivantes :

- L'absence des matières organiques, parce que la source de l'eau est souterraine,
- La dureté élevée par la présence des concentrations élevées de Ca^{++} et de Mg^{++} ,

$$K_w = - 0,30$$

Pour les raisons suivantes :

- Le réseau est relativement nouveau,
- La nature des conduites est en PEHD à paroi lisse avec faible concentration de biofilm,
- Absence des matières organiques et présence de dureté élevée.

Pour les conditions initiales de calcul à mettre dans le réseau, on a adopté les valeurs suivantes :

- Concentration initiale du chlore à l'ordre de 300 mg/l dans le réservoir (valeur du chlore résiduel dans le forage).
- Concentrations initiales dans les nœuds du réseau à l'ordre de 200 mg/l (l'absence de données de terrain, nous avons adopté cette valeur comme valeur minimale de la norme algérienne).

Résultats et interprétations

Temps de séjour

Dans notre cas, on a pu calculer le temps de séjour du réseau étudié (utilisé le logiciel (EPNET), l'idée est de faire suivre un traceur injecté dans le réservoir qui sort avec les volumes d'eau vers les consommateurs. Le traceur injecté ne réagit pas chimiquement. Le temps pour se renouveler les volumes d'eau dans notre réseau de distribution, voir les figures (IV. 1.7.8).

Les résultats représentés ci-dessous se sont des valeurs obtenues pour simuler le temps de séjour le plus long du réseau, c.-à-d., le temps qui se déroule pendant la nuit-là ou les consommations sont faibles :

- Pendant les heures creuses, le temps de séjour est estimé par 01 h et 45 min.
- Pendant les heures de pointe, le temps de séjour est réduit.

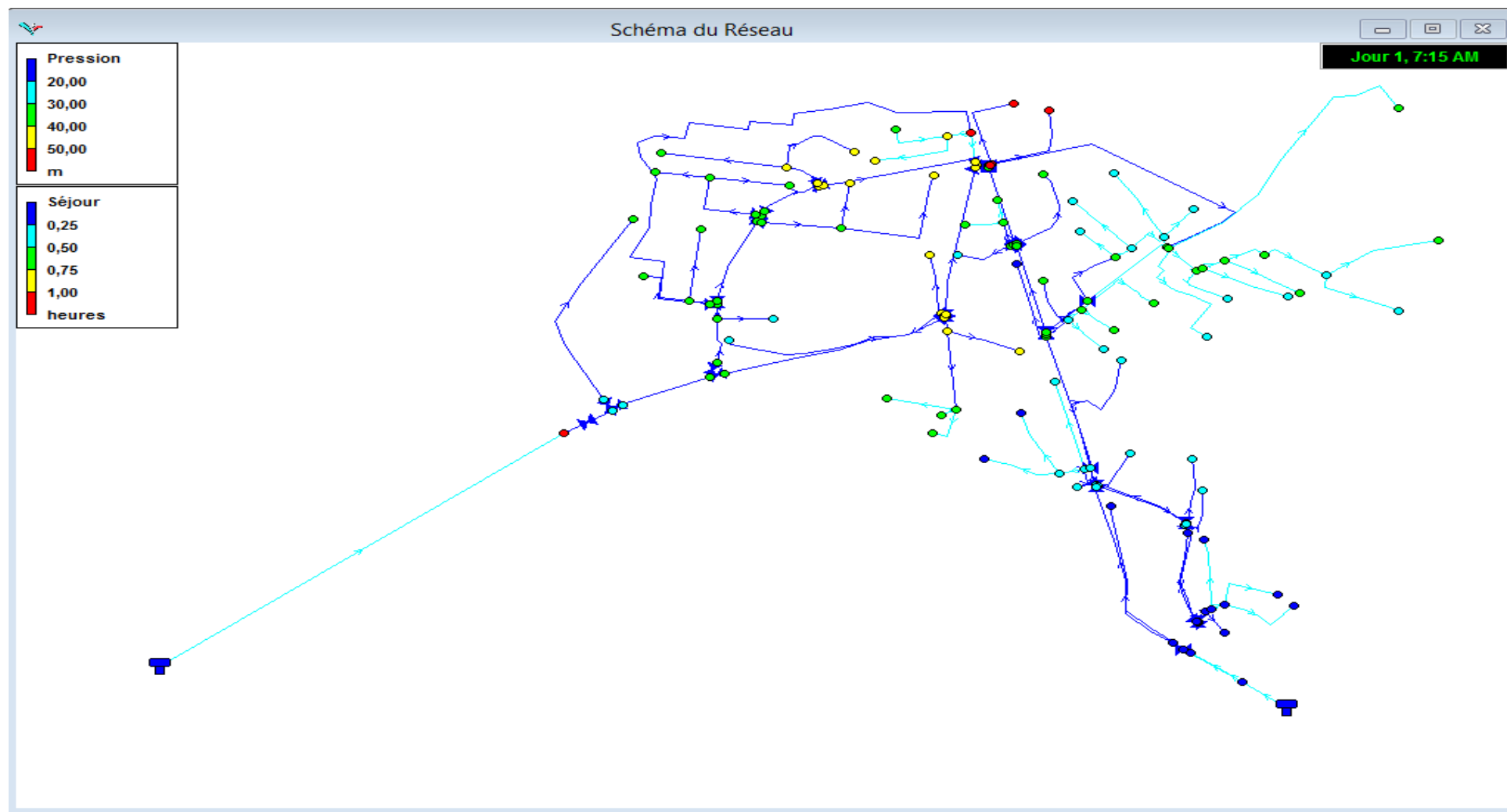


Figure IV. 8: Estimation du temps de séjour du réseau (l'heure de départ à 07 :00 h) à 07 :15

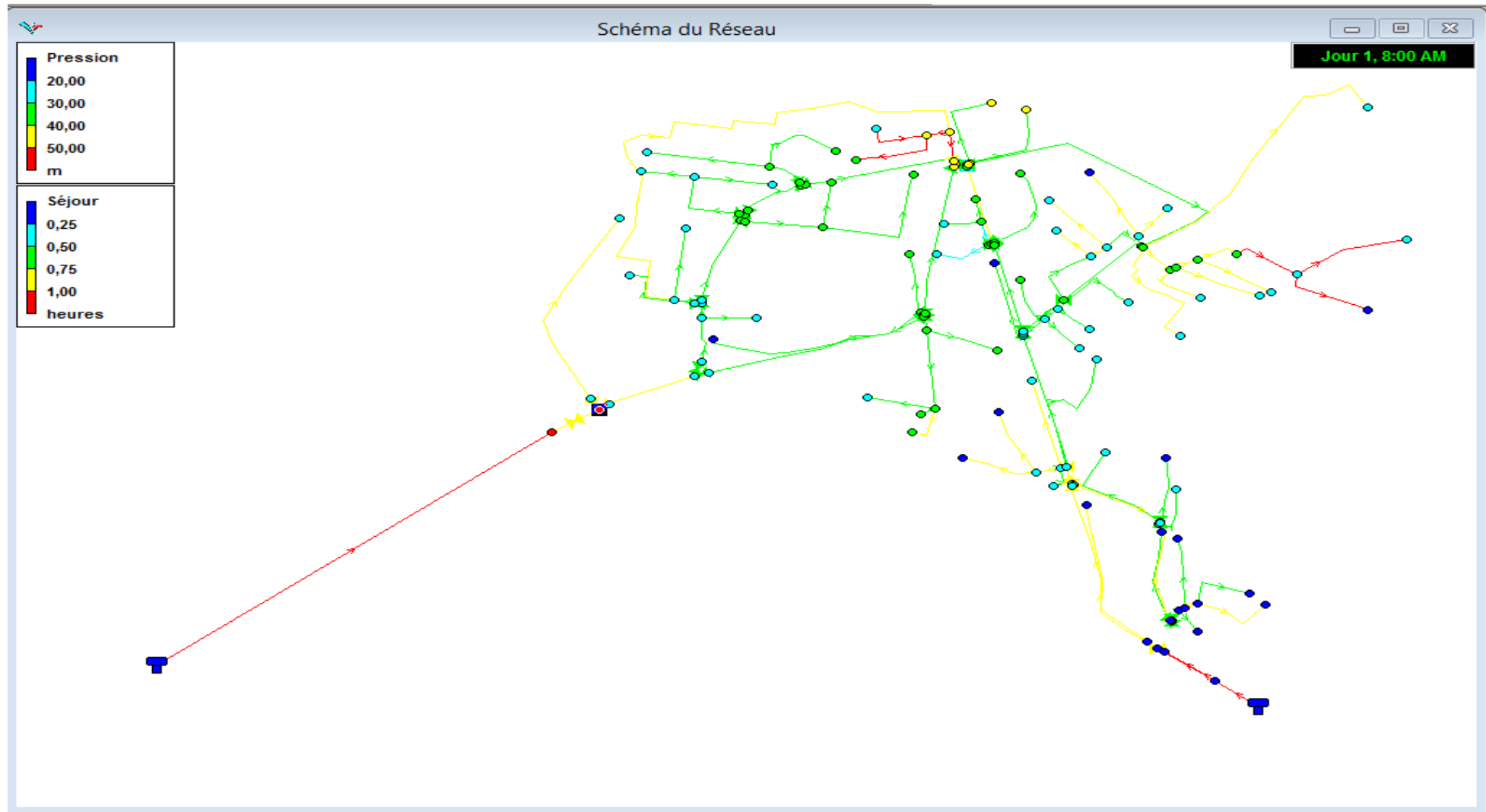


Figure IV. 9: Estimation du temps de séjour du réseau (propagation d'un traceur) à 08:00

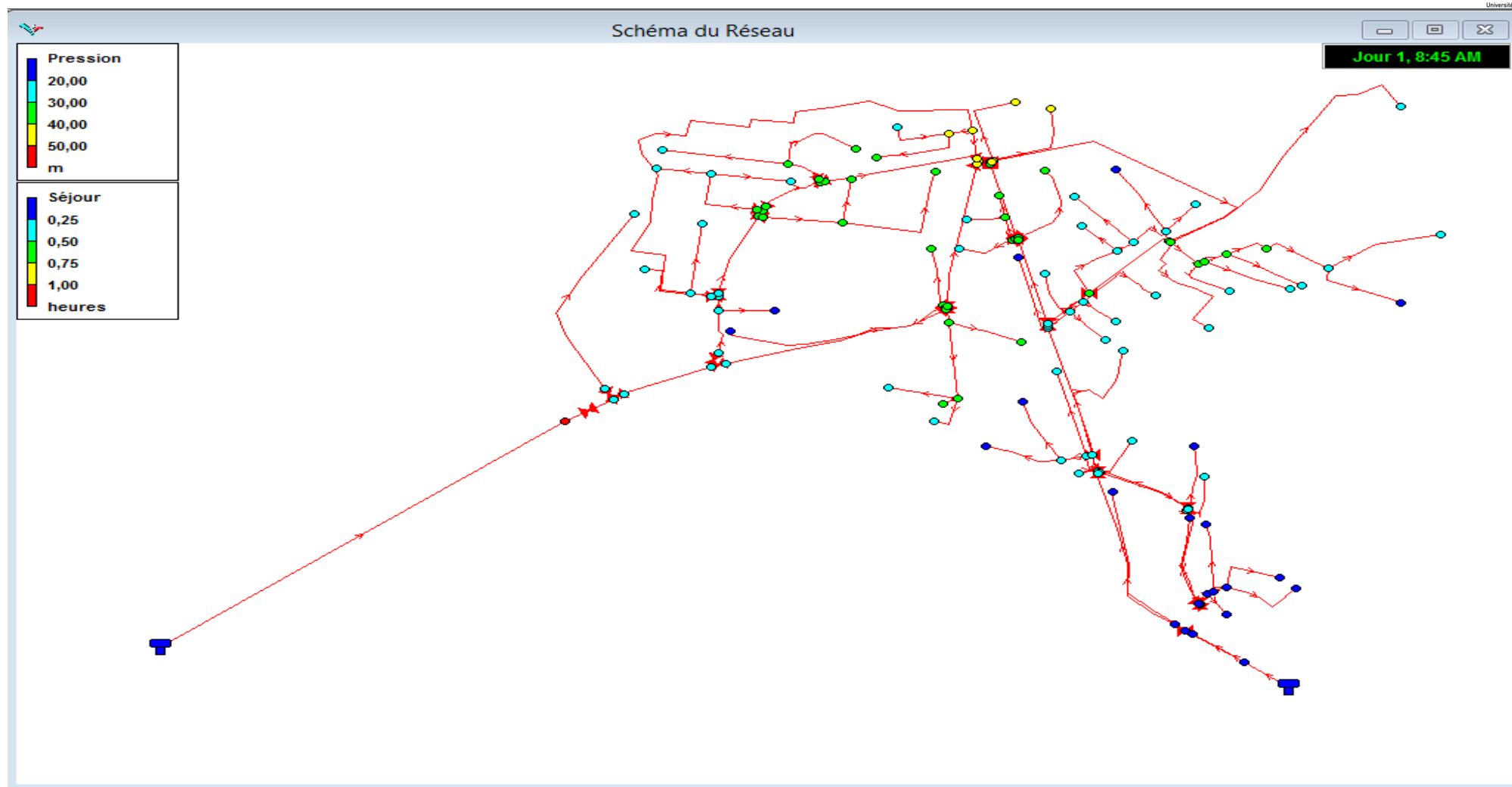


Figure IV. 10: Estimation du temps de séjour du réseau (propagation d'un traceur) 08:45

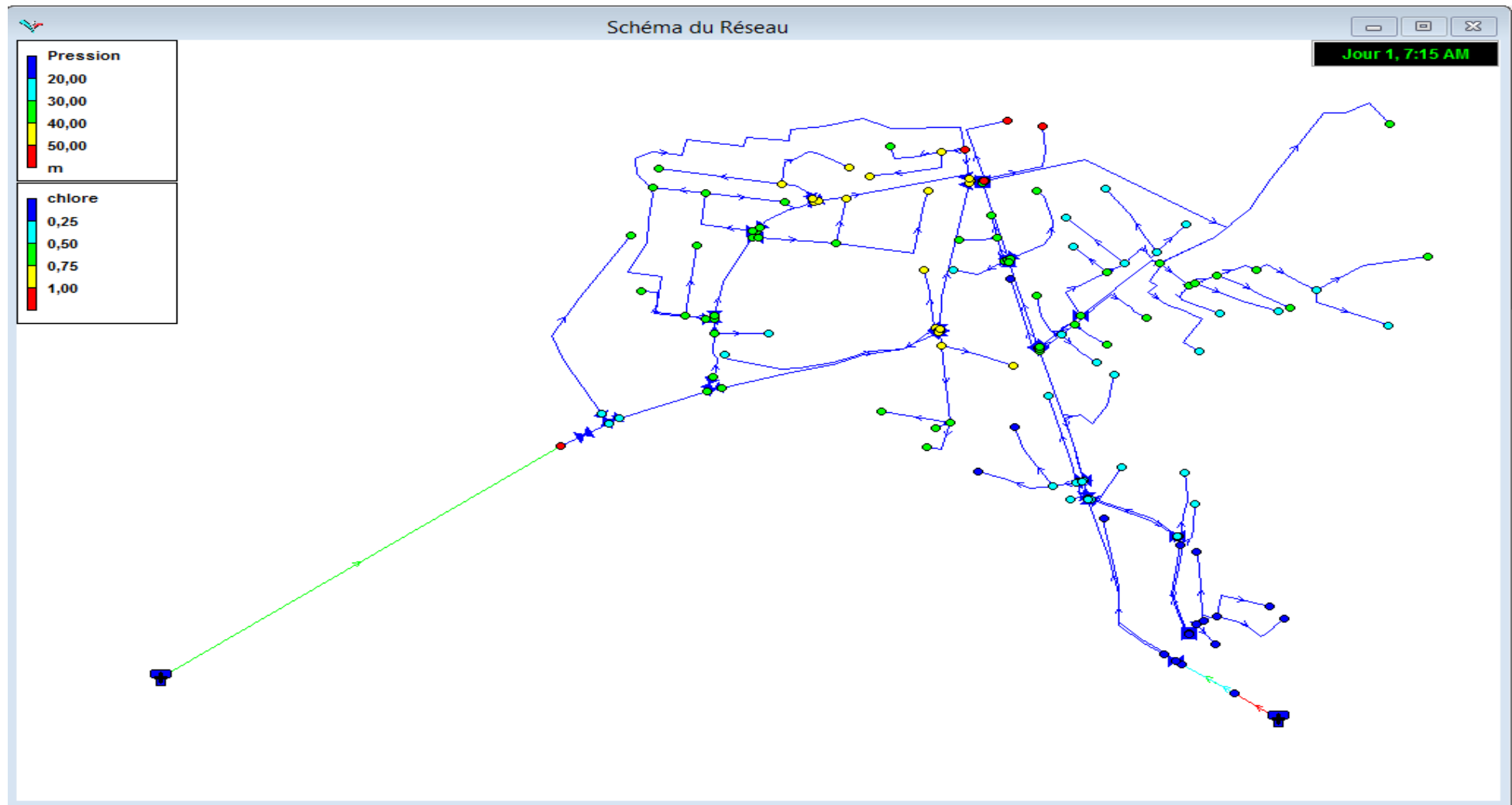


Figure IV. 11: Qualité des eaux : (valeur adimensionnelle) en fonction de la présence des bactéries à (07:15 AM)

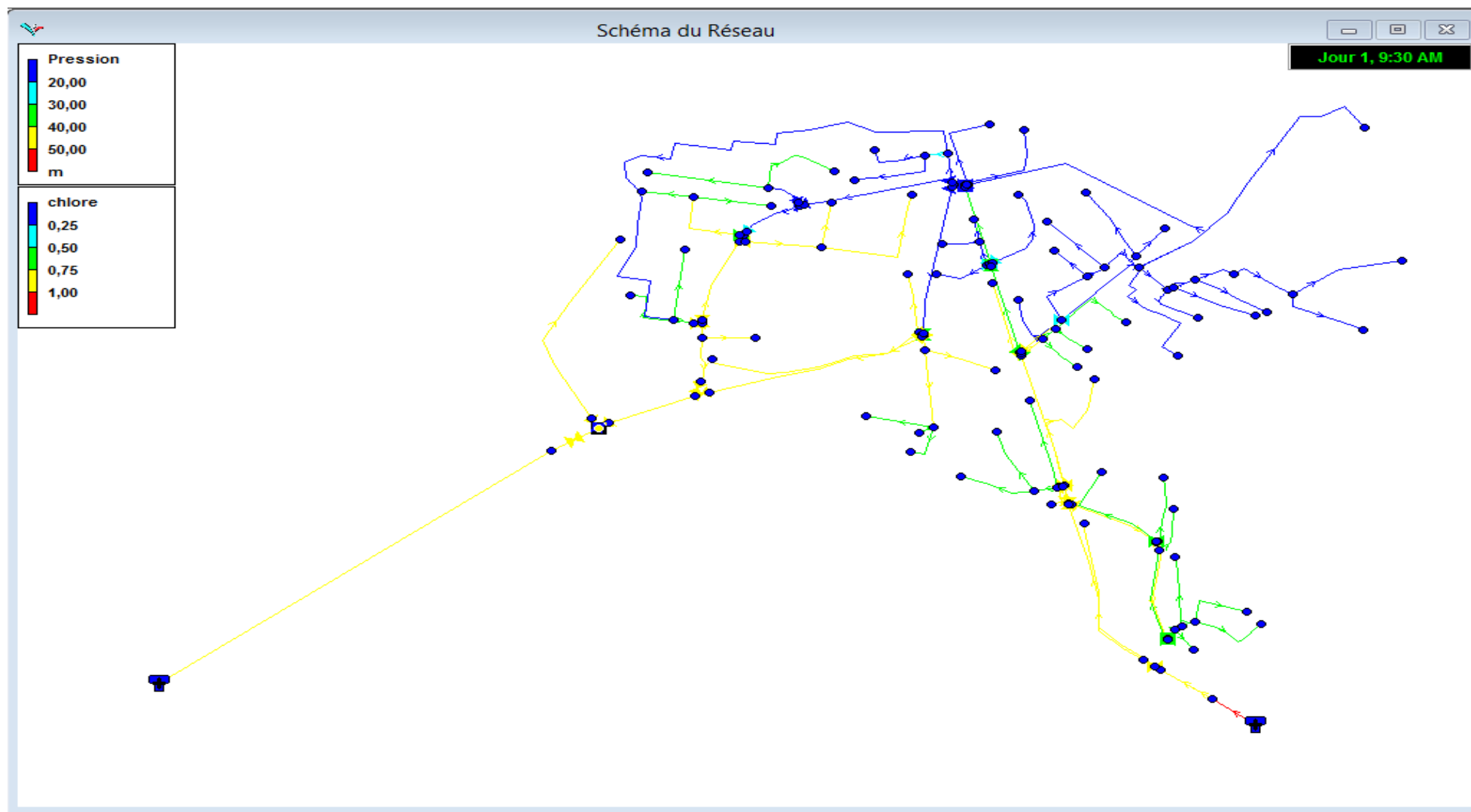


Figure IV. 12: Qualité des eaux : (valeur adimensionnelle) en fonction de la présence des bactéries à (09:30 AM)

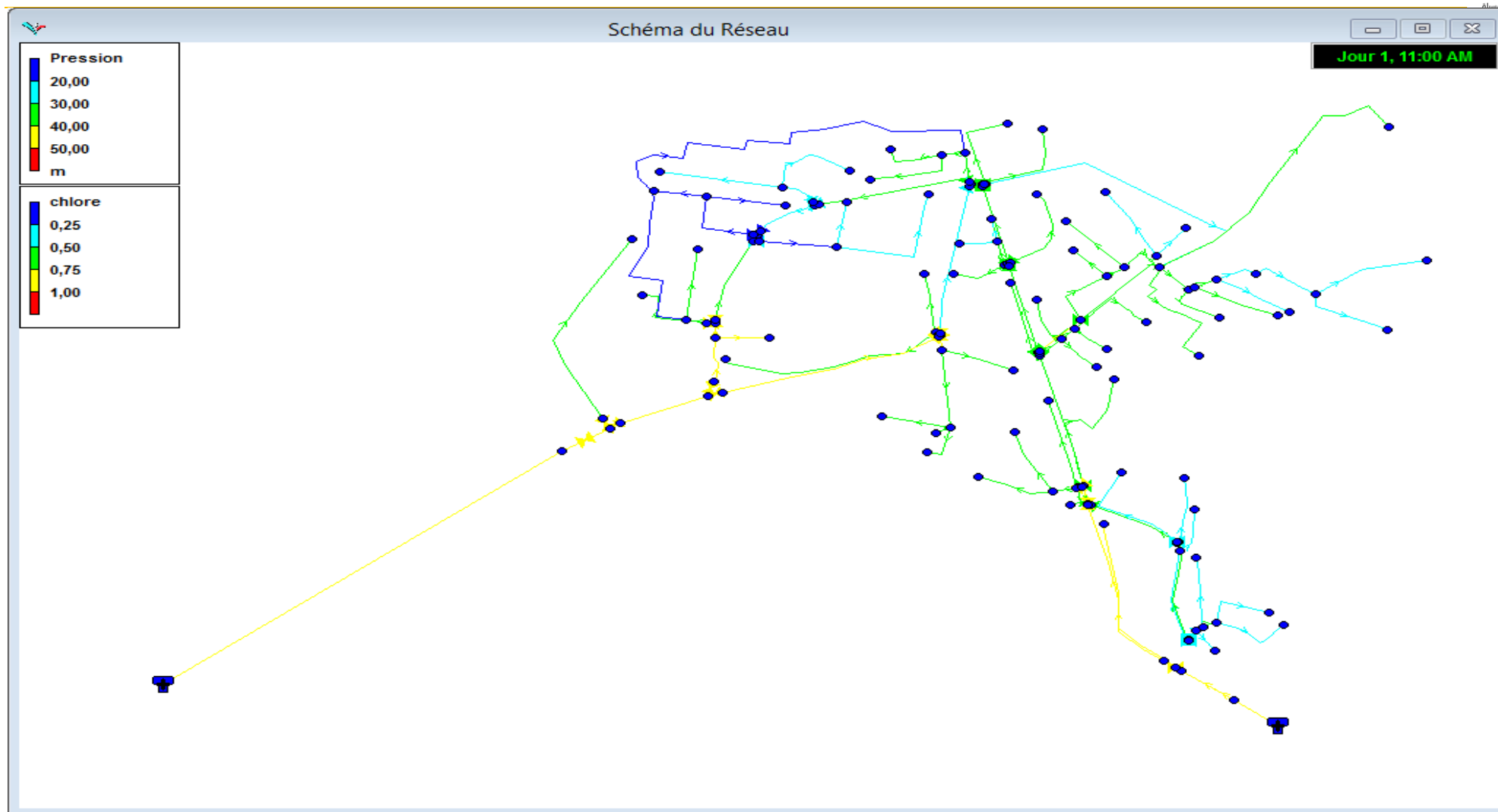


Figure IV. 13: Qualité des eaux : (valeur adimensionnelle) en fonction de la présence des bactéries à (11:00 AM)

Tableau IV. 1 : Dégradation du chlore dans les nœuds du réseau de distribution

ID Nœud	chlore à 11:00 h	chlore 17:00 h
Nœud 1	0,91	0,93
Nœud 2	0,51	0,79
Nœud 3	0,88	0,92
Nœud 4	0,85	0,90
Nœud 5	0,72	0,76
Nœud 6	0,82	0,87
Nœud 7	0,70	0,84
Nœud 8	0,61	0,74
Nœud 9	0,59	0,72
Nœud 10	0,46	0,83
Nœud 11	0,27	0,81
Nœud 12	0,54	0,70
Nœud 13	0,54	0,70
Nœud 14	0,02	0,72
Nœud 15	0,02	0,57
Nœud 16	0,02	0,50
Nœud 17	0,02	0,51
Nœud 18	0,48	0,73
Nœud 19	0,44	0,68
Nœud 20	0,36	0,46
Nœud 21	0,36	0,46
Nœud 22	0,50	0,70
Nœud 23	0,63	0,49
Nœud 24	0,55	0,43
Nœud 25	0,34	0,35
Nœud 26	0,33	0,35
Nœud 27	0,76	0,88
Nœud 28	0,74	0,82
Nœud 29	0,62	0,71
Nœud 30	0,63	0,69
Nœud 31	0,73	0,81
Nœud 32	0,62	0,68
Nœud 33	0,67	0,74
Nœud 34	0,54	0,63
Nœud 35	0,51	0,64
Nœud 36	0,70	0,75
Nœud 37	0,71	0,73
Nœud 38	0,52	0,56
Nœud 39	0,58	0,57
Nœud 40	0,63	0,47

ID Nœud	chlore à 11:00 h	chlore 17:00 h
Nœud 41	0,63	0,50
Nœud 42	0,41	0,45
Nœud 43	0,54	0,47
Nœud 44	0,47	0,39
Nœud 45	0,50	0,42
Nœud 46	0,43	0,37
Nœud 47	0,46	0,39
Nœud 48	0,39	0,33
Nœud 49	0,40	0,35
Nœud 50	0,36	0,33
Nœud 51	0,18	0,26
Nœud 52	0,30	0,27
Nœud 53	0,38	0,44
Nœud 54	0,75	0,60
Nœud 55	0,67	0,56
Nœud 56	0,42	0,47
Nœud 57	0,60	0,49
Nœud 58	0,54	0,41
Nœud 59	0,56	0,42
Nœud 60	0,42	0,35
Nœud 61	0,43	0,36
Nœud 62	0,35	0,31
Nœud 63	0,36	0,31
Nœud 64	0,73	0,61
Nœud 65	0,72	0,60
Nœud 66	0,52	0,53
Nœud 67	0,52	0,53
Nœud 68	0,45	0,47
Nœud 69	0,47	0,49
Nœud 70	0,42	0,39
Nœud 71	0,42	0,39
Nœud 72	0,72	0,65
Nœud 73	0,62	0,57
Nœud 74	0,65	0,59
Nœud 75	0,56	0,46
Nœud 76	0,57	0,47
Nœud 77	0,52	0,42
Nœud 78	0,52	0,42
Nœud 79	0,75	0,71
Nœud 80	0,72	0,66
Nœud 81	0,65	0,53
Nœud 82	0,66	0,55
Nœud 83	0,63	0,52
Nœud 84	0,63	0,52

ID Nœud	chlore à 11:00 h	chlore 17:00 h
Nœud 85	0,53	0,41
Nœud 86	0,53	0,41
Nœud 87	0,48	0,57
Nœud 88	0,80	0,71
Nœud 89	0,82	0,75
Nœud 90	0,64	0,64
Nœud 91	0,81	0,77
Nœud 92	0,44	0,40
Nœud 93	0,38	0,32
Nœud 94	0,50	0,40
Nœud 95	0,50	0,37
Nœud 96	0,51	0,38
Nœud 97	0,41	0,32
Nœud 98	0,44	0,33
Nœud 99	0,40	0,27
Nœud 100	0,39	0,27
Nœud 101	0,53	0,54
Nœud 102	0,35	0,41
Nœud 103	0,33	0,39
Nœud 104	0,34	0,40
Nœud 105	0,34	0,42
Nœud 106	0,85	0,80
Nœud 107	0,68	0,68
Nœud 108	0,57	0,67
Nœud 109	0,74	0,86
Nœud 110	0,92	0,93
Nœud 111	0,88	0,91
Nœud 112	0,88	0,91
Nœud 113	0,76	0,88
Nœud 114	0,76	0,88
Nœud 115	0,24	0,82
Nœud 116	0,02	0,65
Nœud 117	0,42	0,79
Nœud 118	0,46	0,63
Nœud 119	0,48	0,75
Nœud 120	0,46	0,79
Nœud 121	0,65	0,55
Nœud 122	0,71	0,62
Nœud 123	0,72	0,76

ID Nœud	chlore à 11:00 h	chlore 17:00 h
Nœud 124	0,78	0,87
Nœud 125	0,74	0,88
Nœud 126	0,78	0,87
Nœud 127	0,54	0,56
Nœud 128	0,54	0,56
Nœud 129	0,70	0,58
Nœud 130	0,70	0,64
Nœud 131	0,77	0,65
Nœud 132	0,74	0,62
Nœud 133	0,74	0,62
Nœud 134	0,52	0,67
Nœud 135	0,75	0,67
Nœud 136	0,55	0,71
Nœud 137	0,83	0,73
Nœud 138	0,39	0,41
Nœud 139	0,55	0,41
Nœud 140	0,41	0,37
Nœud 141	0,82	0,77
Nœud 143	0,91	0,93
Réservoir 159	0,01	0,00
Réservoir 160	0,01	0,00

Résultats et interprétation

Dans ce travail on a adopté que la réaction chimique suivit une réaction du premier ordre et les coefficients K_b et K_w jouent un rôle important sur le mécanisme de la dégradation du chlore dans le réseau de distribution. L'absence des données de terrain empêche de choisir le champ initial du chlore et de façon générale le champ de qualité. Durant les heures de faibles consommation où les vitesses sont faibles nous avons remarqués à travers les données du tableau (IV-1) que la consommation (ou la destruction) du chlore augmente, tel que le chlore est consommée par la masse d'eau et le biofilm. Par contre durant les heures de pointe où les vitesses d'écoulement dans les conduites augmentent dont nous avons observé des consommations du chlore plus faible.

La simulation permet de déterminer les "sources" d'eau d'un réseau et leur zone d'influence, les concentrations de mélange de différentes eaux, de tracer la carte du chlore résiduel,

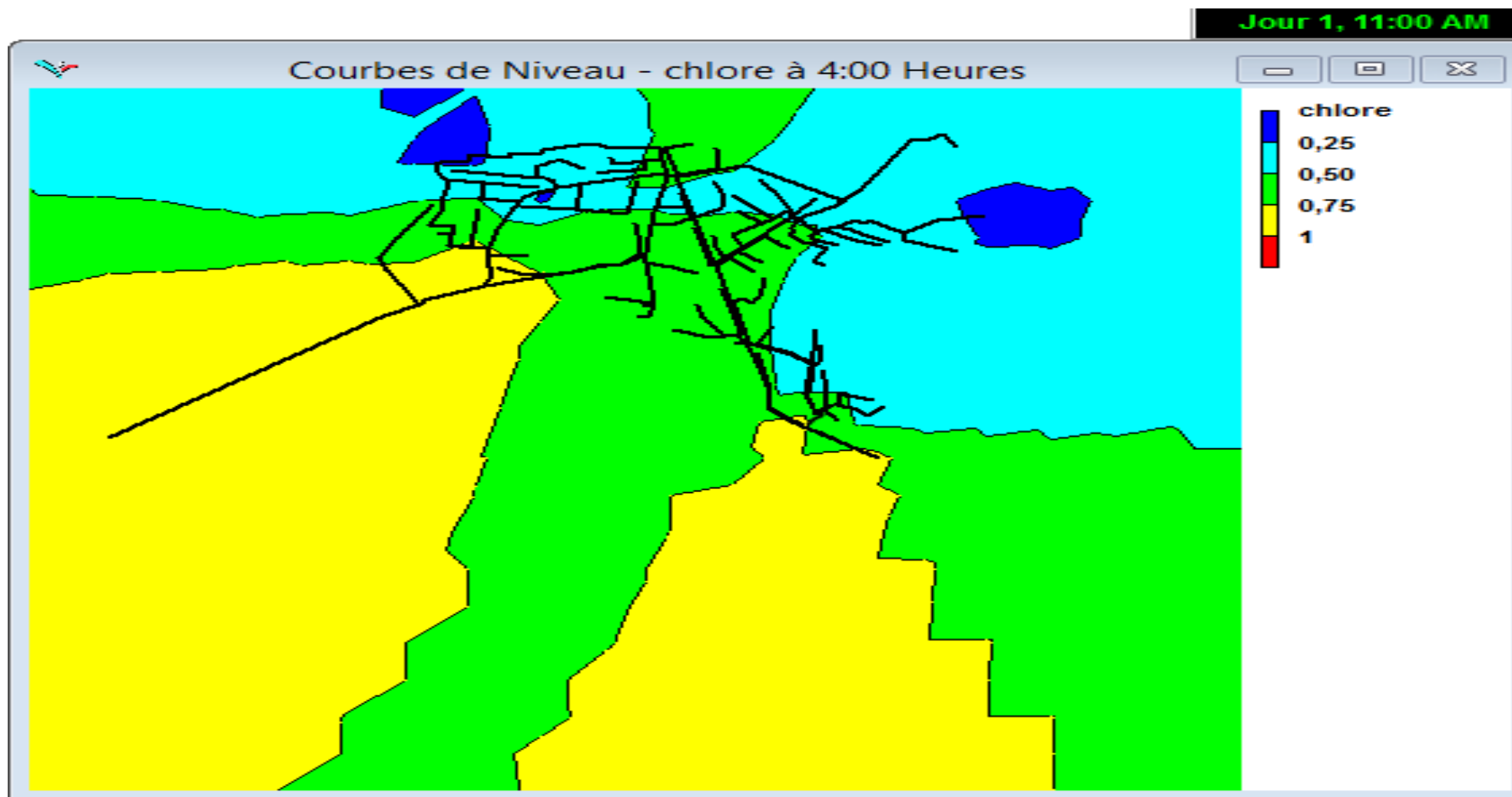


Figure IV. 14: Courbe de niveau de chloration de réseaux

En modélisation numérique, la plupart des modèles de qualité d'eau utilisent le temps de résidence hydraulique pour calculer les concentrations de différents composés. L'hypothèse faite dans cette étude est que plus le temps de séjour est court, meilleure est la qualité de l'eau. C'est ce qui justifie l'utilisation de cet indicateur comme un des objectifs à minimiser lors de la conception optimale des réseaux de distribution. Bien qu'un temps de séjour faible ne soit pas synonyme d'une bonne qualité de l'eau, minimiser ce temps permet de réduire la détérioration de qualité initiale de l'eau.

Dans cette étude le temps de séjour est 01 :45h s'avère satisfaisante et convaincante et donne de bon résultat

Nous avons travaillé avec des variables adimensionnelles pour les concentrations du chlore. Les figures IV.12 et IV.11 indiquent la propagation du désinfectant dans le réseau, sachant que l'opération est effectuée à matin (07 :00 à 11 :00) à partir des deux réservoirs.

IV.9. Conclusion

Les réseaux de distribution d'eau potable ne peuvent plus aujourd'hui être considérés comme de simples outils de transport de l'eau jusqu'aux consommateurs. Ils constituent un véritable réacteur biologique, à l'intérieur duquel se met en place une dynamique bactérienne, et une croissance des microorganismes est observable, au détriment de la matière organique biodégradable, ou au détriment d'autres microorganismes.

Sommaire

IV.1. Introduction.....	65
IV.2. Les Réseaux de distribution d'eau potable en tant que réacteur complexe :	65
IV.3. Evolution de la qualité de l'eau le long d'un système de distribution d'eau potable :	66
IV.4. Chloration de l'eau (eaux des forages).....	69
IV.4.1. Chloration en réservoir avec recirculation :	69
IV.4.2. Chloration en ligne :	69
IV.5. Théorie de la cinétique chimique	71
IV.5.1. La cinétique des réactions	71
IV.6. La modélisation de la qualité de l'eau dans Epanet:	72
IV.7. Temps de Séjour.....	73
IV.8. Dégradation du chlore dans le réseau de distribution	73
IV.9. Conclusion	86

Liste des figures

Figure IV. 1: Schéma d'un réseau réacteur3.....	65
Figure IV. 2: Exemple de l'altération de la qualité microbiologique le long d'un système de....	66
Figure IV. 3: Représentation schématique de la formation d'un biofilm dans d'un réseau de distribution.	68
Figure IV. 4: Installation de chloration en ligne.	70
Figure IV. 5: Zones de réactions à l'intérieur d'un tuyau	72
Figure IV. 6: Estimation du temps de séjour du réseau de distribution à 07 :15 communes de TIMGAD.....	75
Figure IV. 7: Estimation du temps de séjour du réseau de distribution à 08:00 commune de TIMGAD.....	76

Figure IV. 8: Estimation du temps de séjour du réseau de distribution à 08:45 commune de TIMGAD	77
Figure IV. 9: Dégradation du chlore adimensional à (07:15 AM)	78
Figure IV. 10: Dégradation du chlore adimensional à (09:30 AM)	79
Figure IV. 11: Dégradation du chlore adimensional à (11:00 AM)	80
Figure IV. 12: Courbe de niveau de chloration de réseaux de tempe maximal	85

Liste de tableau :

Tableau IV. 1 : Dégradation du chlore dans les nœuds du réseau de distribution	81
--	----