Produire de l'eau potable
à partir d'une eau de rivière

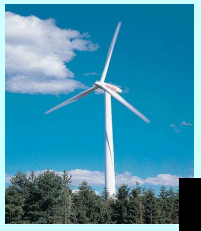
Professeur Joseph DE LAAT
Laboratoire de Chimie et Microbiologie de l'Eau – UMR CNRS 6008
ENSI Poitiers – Université de Poitiers

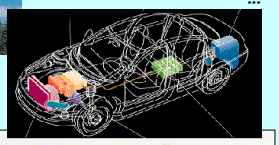
Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Poitiers (ENSIP)

≈ 125 élèves par promotion (CCP: 96 places, G2E: 8 places – Dossiers: 21 places)

Energie (75 élèves)

Production d'énergie
Economie d'énergie
Génie électrique
Moteurs
Eclairage
Acoustique
Thermique
…





Eau et Génie Civil (50 élèves)

Matériaux de construction
Géotechnique
Routes
Traitement des eaux
Sols et sites pollués
Pollution de l'air
Déchets

Laboratoire de Chimie et Microbiologie de l'Eau (UMR CNRS 6008)

Effectif:

20 enseignants-chercheurs
12 Chimistes,
4 Microbiologistes,
4 Pharmaciens, médecins

10 techniciens et secrétaires

≈ 30 doctorants en chimie et microbiologie de l'eau

≈ 15 stagiaires

Axes de recherche:

Chimie et traitement des eaux

Matières organiques naturelles et biofilms

Microbiologie des eaux

Eau et Santé

Plan de la présentation

- Présentations de l'ENSIP et du LCME
- L'eau potable : Consommation et qualité d'eau

1. Consommation d'eau potable par habitant
2. Origine et composition des eaux destinées à la consommation humaine
3. Normes de qualité pour l'eau potable

- Présentation d'une usine d'eau potable
  → Usine de Neuilly-sur-Marne/Noisy-le-Grand

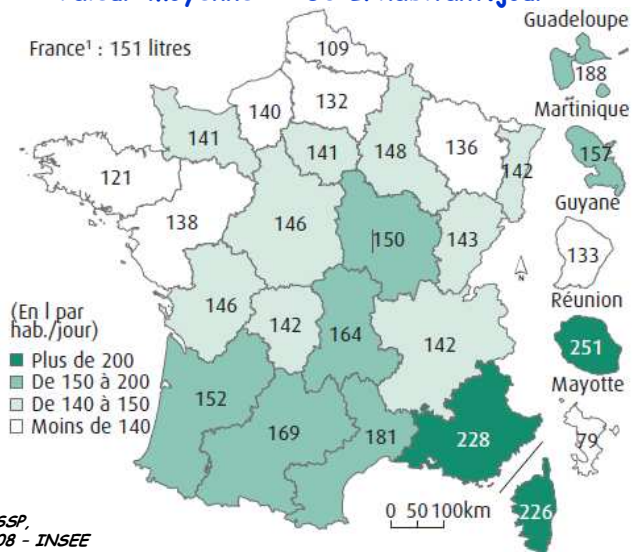
1. Analyse de l'eau brute et objectifs du traitement
2. Présentation des étapes du traitement de l'eau de la Marne
   - ✓ Les prétraitements
   - ✓ La clarification
   - ✓ L'affinage
   - ✓ La désinfection
   - ✓ Les traitements additionnels
3. Le contrôle de la qualité de l'eau distribuée

- Conclusion

Consommation d'eau potable en France

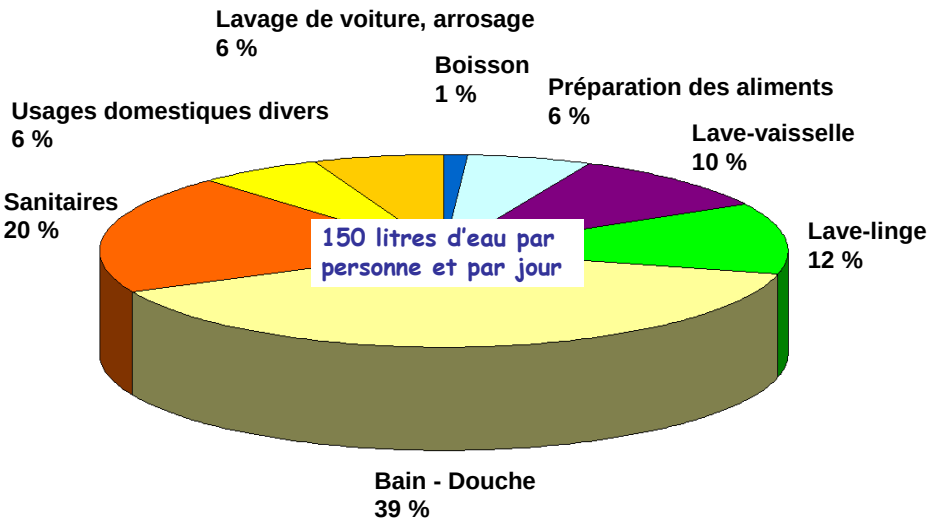
Consommation d'eau potable par les ménages : 110 à 250 L/habitant.jour

Valeur moyenne : 150 L/habitant.jour



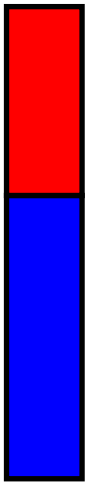
Source: SOeS-SSP, Enquête Eau 2008 - INSEE

Consommation d'eau potable en France



Production d'eau potable en France : Origines de l'eau

Production d'eau potable en France : 6 milliards de m^3 par an



40 % de l'eau potable provient d'eau superficielle (rivières, lacs , barrages)

1 400 captages, gros débits

Eau de qualité très variable

Usines de production d'eau potable avec de nombreux traitements

9 % des communes alimentées uniquement en eau superficielle

11 % par une mélange d'eau superficielle et d'eau souterraine

60 % de l'eau potable provient d'eau souterraine

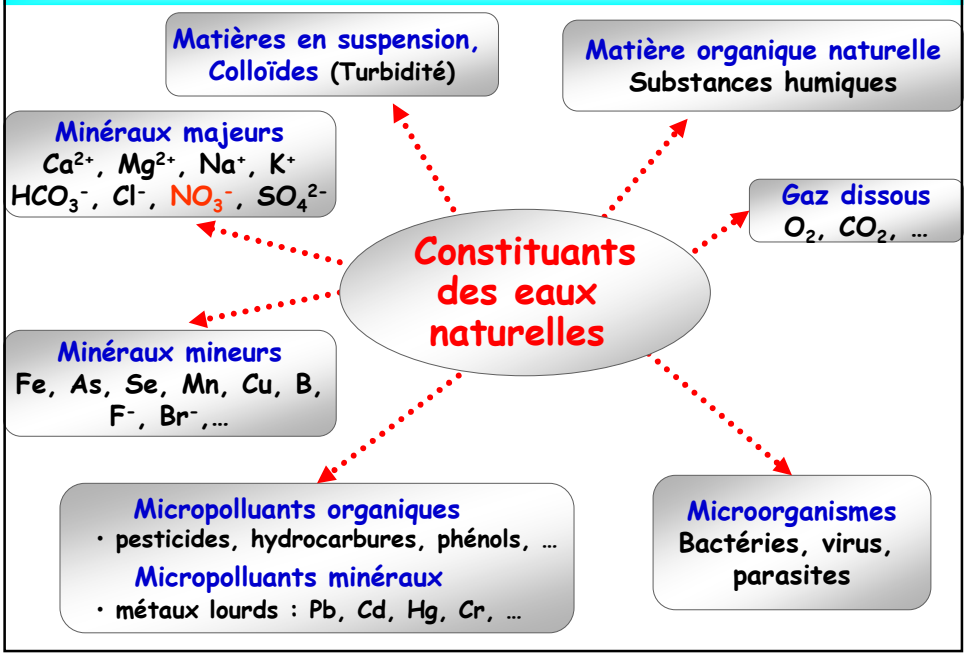
28 000 captages, petits débits

Eau de bonne qualité

Traitements simples

80 % des communes alimentées uniquement en eau souterraine

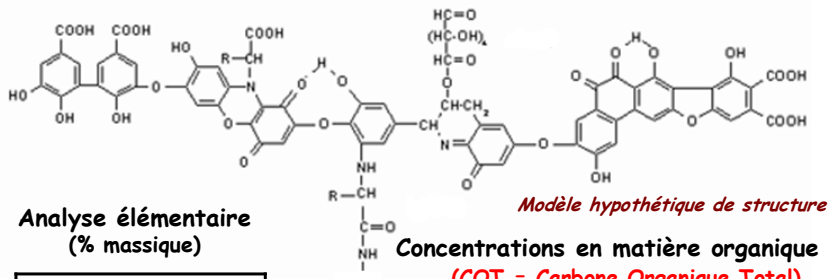
Composition des eaux naturelles



Matière organique naturelle : substances humiques

⇨ **Issues de la décomposition lente des végétaux**
Masse molaire des SH des sols : → 300 000 g/mole
Masse molaire des SH dans les eaux : 500 à 2 500 g/mole

⇨ **Structure :** Noyaux aromatiques, groupements phénoliques
Nombreuses liaisons conjuguées ⇒ coloration des eaux



Modèle hypothétique de structure des SH

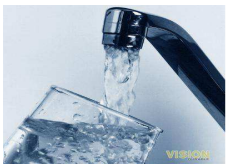
Analyse élémentaire
(% massique)

C	47 - 53 %
H	4 - 7 %
O	30 - 40 %
N	2 - 4,5 %
S	0,5 - 1,5 %

Concentrations en matière organique
(COT = Carbone Organique Total)

	mg/L	mg C/L (COT)
Eau de nappe	< 1	< 0,5
Eau de rivière	5 à 20	2,5 à 10
Eau de barrage	10 à 40	5 à 20

Réglementation : Eaux destinées à la consommation humaine



➔ **54 paramètres de qualité**
à respecter pour l'eau distribuée au robinet du consommateur
(depuis janvier 2007)

- **Limites de qualité (31)**
  - **Paramètres microbiologiques (2)**
    indicateurs de contamination fécale : coliformes, entérocoques
  - **Paramètres chimiques (29)**
    - nitrate, pesticides, hydrocarbures aromatiques polycycliques
    - turbidité
    - sous-produits de désinfection (bromate, trihalométhanes)
    - arsenic, fluorure, cadmium, cyanure, mercure, plomb …
- **Références de qualité (23)**
  - couleur, odeur, saveur, pH, conductivité, …
  - chlorures, fer, cuivre, aluminium, manganèse, …
  - carbone organique total
  - chlore (libre et total), chlorite
  - équilibre calco-carbonique

Production d'eau potable : principaux défis

Eliminer les matières colloïdales et la matière organique naturelle

Eliminer les polluants organiques et minéraux
- nitrate, …
- pesticides, hydrocarbures halogénés, HAP, phénols, métaux lourds, …
- micropolluants émergents: résidus de médicaments, perturbateurs endocriniens, cyanotoxines, …

Garantir la désinfection
éliminer les microorganismes pathogènes (bactéries, virus, protozoaires, …)
➔ ex : *Cryptosporidium* et *Giardia*

Maîtriser les sous-produits de désinfection

Assurer la qualité de l'eau jusqu'au robinet du consommateur

Plan de la présentation

- **Présentations de l'ENSIP et du LCME**
- **L'eau potable : Consommation et qualité d'eau**

1. Consommation d'eau potable par habitant
2. Origine et composition des eaux destinées à la consommation humaine
3. Normes de qualité pour l'eau potable

- **Présentation d'une usine d'eau potable**
  ➔ Usine de Neuilly-sur-Marne/Noisy-le-Grand

1. Analyse de l'eau brute et objectifs du traitement
2. Présentation des étapes du traitement de l'eau de la Marne
   - ✓ Les prétraitements
   - ✓ La clarification
   - ✓ L'affinage
   - ✓ La désinfection
   - ✓ Les traitements additionnels
3. Le contrôle de la qualité de l'eau distribuée

- **Conclusion**

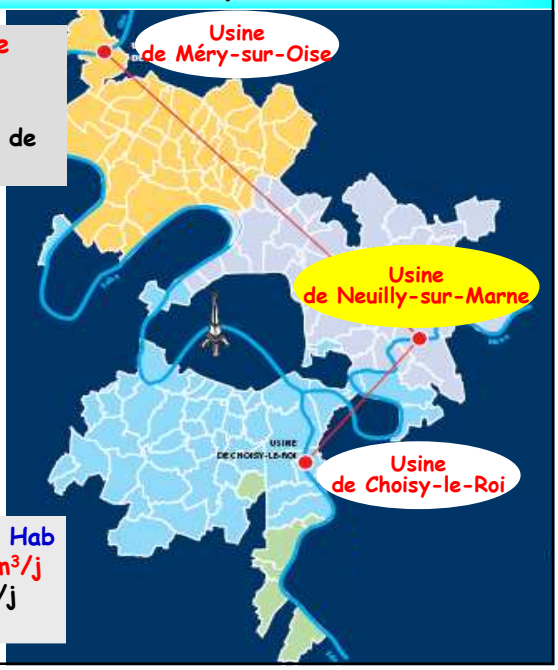
Usine de production d'eau potable

➔ Usine de Neuilly-sur-Marne /Noisy-le-Grand

Produire de l'eau potable à partir de l'eau de la rivière Marne

➔ Usine du SEDIF (Syndicat des Eaux d'Ile de France)
➔ construite depuis 1965

Population desservie = 1 600 000 Hab
Production moyenne = 300 000 m³/j
Débit maximum = 600 000 m³/j
Surface totale = 25 ha



Plan de la présentation

- Présentations de l'ENSIP et du LCME
- L'eau potable : Consommation et qualité d'eau

1. Consommation d'eau potable par habitant
2. Origine et composition des eaux destinées à la consommation humaine
3. Normes de qualité pour l'eau potable

- Présentation d'une usine d'eau potable
  ➔ Usine de Neuilly-sur-Marne/Noisy-le-Grand

1. Analyse de l'eau brute et objectifs du traitement
2. Présentation des étapes du traitement de l'eau de la Marne
   - ✓ Les prétraitements
   - ✓ La clarification
   - ✓ L'affinage
   - ✓ La désinfection
   - ✓ Les traitements additionnels
3. Le contrôle de la qualité de l'eau distribuée

- Conclusion

Analyse de l'eau de la Marne

Qualité de l'eau de la Marne :
- intenses activités agricoles et industrielles sur le bassin versant en amont de la prise d'eau en rivière
- risques de pollutions accidentelles

⇒ **Station d'alerte à 4 km en amont de la prise d'eau**

Station d'alerte
4 km en amont de la prise d'eau

Préleveurs automatiques

Paramètres mesurés

- pH, Conductivité
- Turbidité
- O_2 dissous
- Carbone organique
- Nitrate, nitrite
- Métaux lourds
- Hydrocarbures
- Cyanure, …

Analyse de l'eau de la Marne

Paramètres chimiques et physico-chimiques

	Paramètre	Valeur médiane mesurée	Méthode d'analyse
	pH à 20°C	7,9	pH-métrie
	Turbidité	4 NFU	Turbidimétrie (photométrie)
Cations majeurs	Ca^{2+}	90 mg/L	Complexométrie (dosage volumétrique)
	Mg^{2+}	10,2 mg/L	
	Na^{+}	9,5 mg/L	Photométrie de flamme
	K^{+}	3,3 mg/L	
Anions majeurs	HCO_3^-	148 mg/L	Dosage acidimétrique
	SO_4^{2-}	37,5 mg/L	Chromatographie ionique
	NO_3^-	20,4 mg/L	
	Cl^-	21,4 mg/L	
	COT (Carbone Organique Total)	4,5 mg/L	Analyseur de Carbone
	Pesticides totaux	<0,19 µg/L	Chromatographie phase gazeuse Spectrométrie de masse

Analyse de l'eau de la Marne

Paramètres bactériologiques

Germes-tests de contamination	Gammes de valeurs mesurées (nombre/100 mL)	Méthode d'analyse
Coliformes totaux	6 800 – 534 000	Dénombrement après concentration et ensemencement en gélose nutritive
Escherichia coli	2 300 – 43 700	
Entérocoques	140 – 4 000	

Objectifs du traitement

Paramètre	Valeur mesurée	Limite de qualité	Référence de qualité
pH à 20 °C	7,9		6,5 < pH < 9
Turbidité	4 NFU	1 NFU	
Ca^{2+}	90 mg/L		
Mg^{2+}	10,2 mg/L		
Na^{+}	9,5 mg/L		200 mg/L
K^{+}	3,3 mg/L		
HCO_3^{-}	148 mg/L		
SO_4^{2-}	37,5 mg/L		250 mg/L
NO_3^{-}	20,4 mg/L	50 mg/L	
Cl^{-}	21,4 mg/L		250 mg/L
Carbone Organique total	4,5 mg C/L		2 mg C/L
Pesticides totaux*	< 0,19 µg/L*	0,5 µg/L	
Escherichia Coli	23 000/100 mL	0/100 mL	
Entérocoques	2 000/100 mL	0/100 mL	

*Valeur limite : 0,1 µg/L par pesticide

Plan de la présentation

- Présentations de l'ENSIP et du LCME
- L'eau potable : Consommation et qualité d'eau

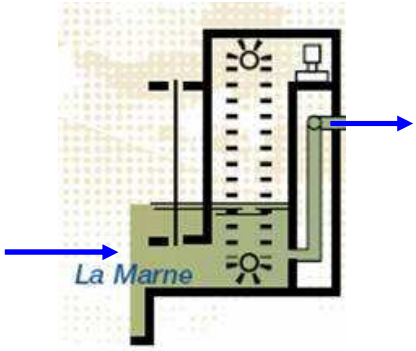
1. Consommation d'eau potable par habitant
2. Origine et composition des eaux destinées à la consommation humaine
3. Normes de qualité pour l'eau potable

- Présentation d'une usine d'eau potable
  → Usine de Neuilly-sur-Marne/Noisy-le-Grand

1. Analyse de l'eau brute et objectifs du traitement
2. Présentation des étapes du traitement de l'eau de la Marne
   - ✓ Les prétraitements
   - ✓ La clarification
   - ✓ L'affinage
   - ✓ La désinfection
   - ✓ Les traitements additionnels
3. Le contrôle de la qualité de l'eau distribuée

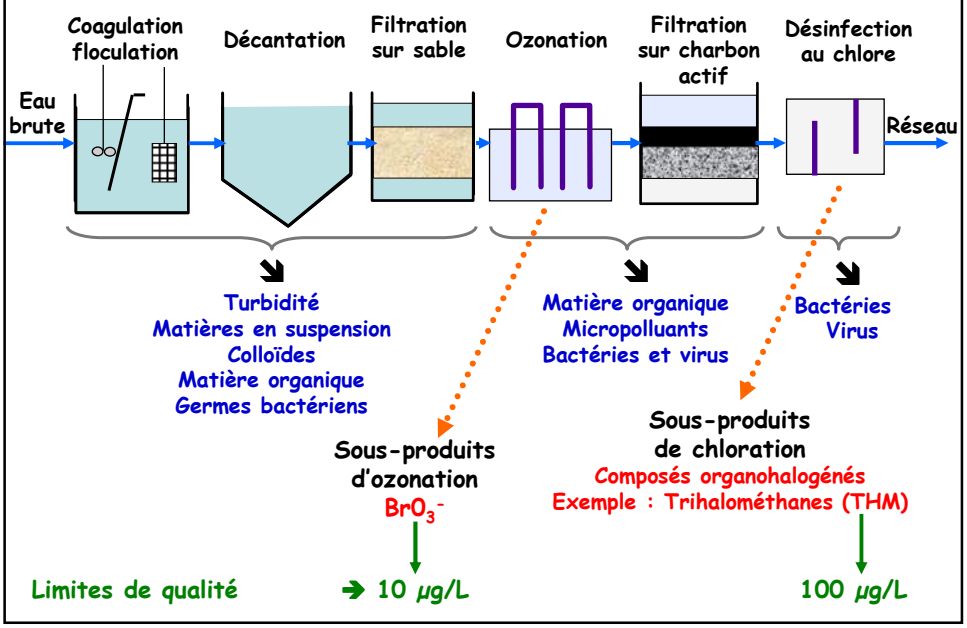
- Conclusion

Les prétraitements de l'eau

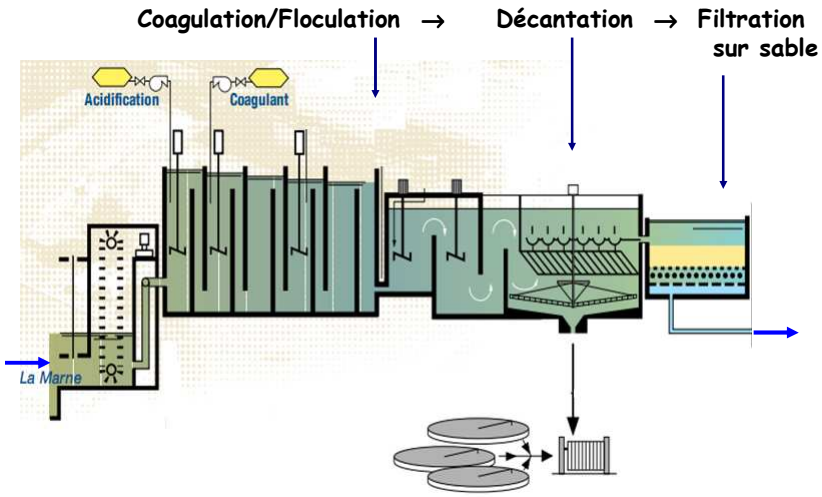


Prétraitements au niveau de la prise d'eau en rivière : Elimination des objets flottants et encombrants par dégrillage et tamisage

Les étapes du traitement



La clarification de l'eau



Introduction de réactifs chimiques:

- **Coagulant** ➔ sels de fer (Fe^{3+}) ou d'aluminium (Al^{3+})
- **Acide** ➔ pour être au pH optimal de réaction (pH 5,5 à 6)

Coagulation/floculation : Réactions

Réaction avec les sels de fer (bilan simplifié de l'hydrolyse)

$$Fe^{3+} + 6\ H_2O \leftrightarrows Fe(OH)_3 + 3\ H_3O^+$$

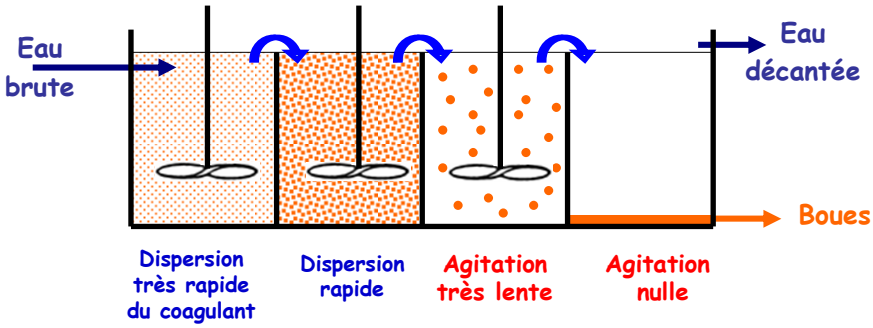
Polymère amorphe d'hydroxyde ferrique
qui va piéger ou emprisonner les colloïdes
et les faire décanter

Formation du floc → Grossissement du floc → Décantation

Coagulation/floculation : mise en œuvre

Réacteurs en série, agités avec intensité d'agitation décroissante

Coagulation → Floculation → Décantation

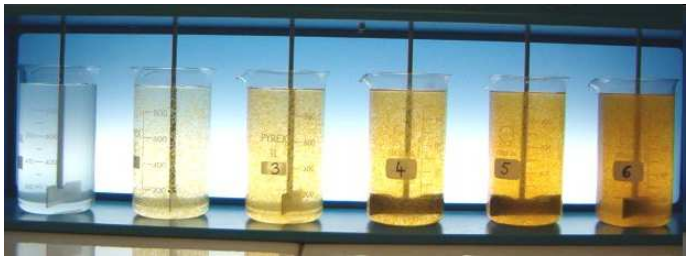


Neutralisation des charges des colloïdes et agglomération des colloïdes
Piégeage des colloïdes et des MES par les flocs
Adsorption des MON à la surface des particules d'hydroxydes

Coagulation/floculation : « Jar test »

Dose optimale de coagulant et le pH optimal dépendent de la turbidité, de la teneur en MES et en COT, de la conductivité, de la température

Jar-test : détermination de la dose optimale de coagulant et du pH optimal

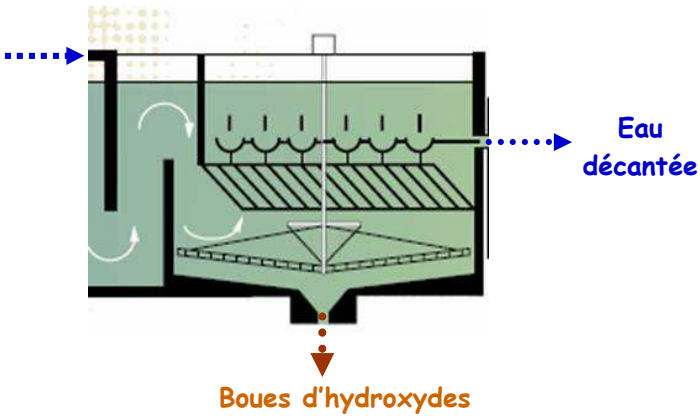


Paramètres suivis :

- aspect des flocs (taille, vitesse de décantation, …)
- pH
- Concentration en coagulant dissous
- Turbidité
- Concentration en matières organiques (COT)

Décantation

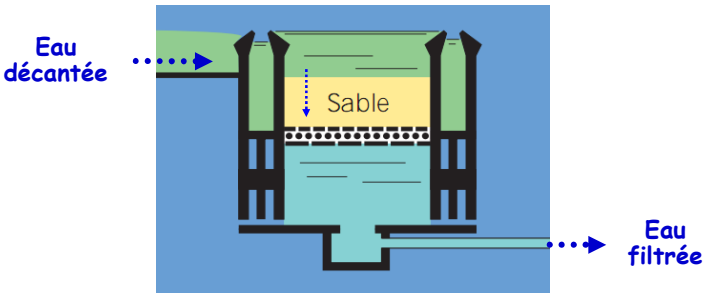
Etape de séparation solide/liquide (flocs d'hydroxydes/eau traitée)



Temps de séjour de l'eau dans le décanteur : ≈ 2 heures

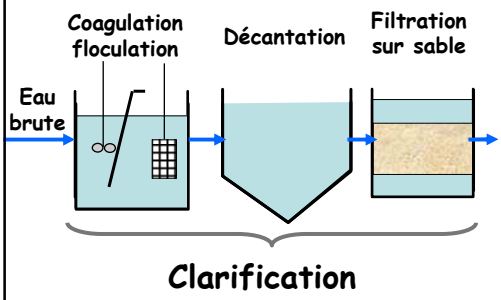
Filtration sur sable

Objectif : retenir les dernières particules afin d'avoir une eau limpide



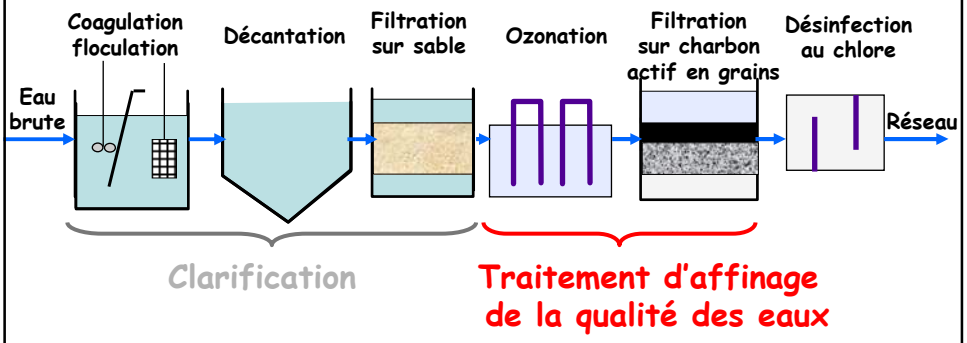
Hauteur du lit de sable	1,4 m
Granulométrie du sable	1 mm
Vitesse de filtration	5 m/h
Temps de séjour de l'eau	16 min

Efficacité de la clarification



	Eau brute	Eau décantée	Eau filtrée
Turbidité (NFU)	28	0,4	0,04
MES (mg/L)	34	1,2	0
COT (mg C/L)	4,7	1,5	1,4

Traitement d'affinage

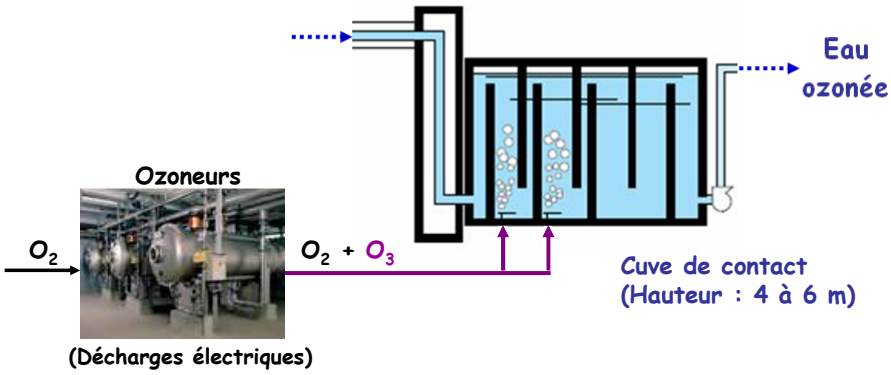


Objectifs:

- ➔ Action sur la matière organique non éliminée par la clarification
- ➔ Action sur les micropolluants organiques (pesticides)
- ➔ Désinfection

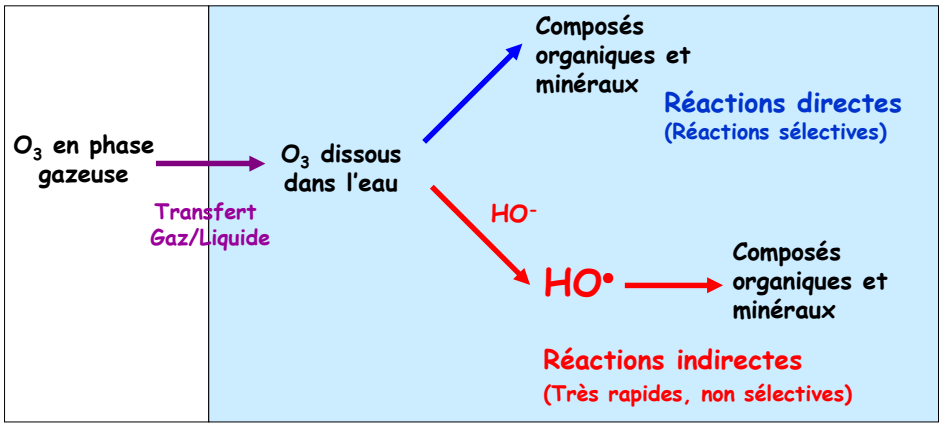
Ozonation (mise en œuvre de O_3)

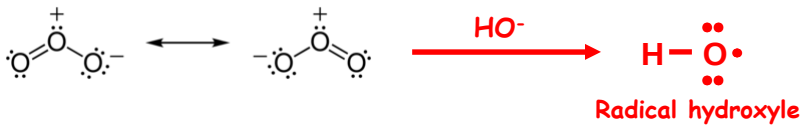
Production d'ozone sur site à partir d'air sec → Transfert de O_3 gazeux dans l'eau à l'aide de diffuseurs



Doses d'ozone usuelles : 1 à 4 mg O_3/L d'eau (soit 1 à 4 g/m^3 d'eau)

Ozonation : modes d'action





Ozonation : Objectifs

1. Oxydation partielle de la matière organique naturelle

⇒ formation de sous-produits biodégradables (acides carboxyliques)

⇒ diminution de la couleur de l'eau

⇒ diminuer la formation de sous-produits chlorés lors de la désinfection finale par le chlore

2. Oxydation de micropolluants organiques

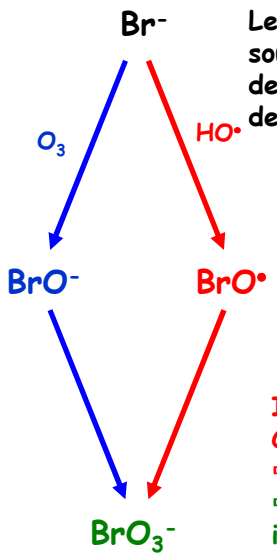
⇒ Elimination des pesticides

⇒ Elimination des molécules responsables de goûts et d'odeurs

3. Désinfection

⇒ Inactivation des germes pathogènes (bactéries, virus, protozoaires, …)

Ozonation (Formation de BrO_3^-)

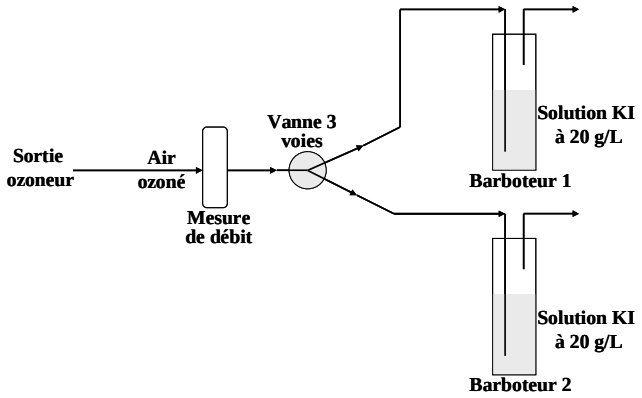


Les ions bromure sont présents dans les eaux souterraines et dans les eaux de rivière à des concentrations de l'ordre de 10 à 200 µg Br^-/L

Ion Bromate : sous-produit génotoxique
Concentration maximale : 10 µg/L
⇨ Inconvénient majeur de l'ozonation
⇨ Bien maîtriser les doses d'ozone introduit dans l'eau

Ozonation : dosage de l'ozone dans un gaz

1. Absorption de O_3 dans du KI (≈ 20 g/L)



et oxydation des ions iodure en diiode et en iodate par O_3

$$O_3 + H_2O + 2\ I^- \rightarrow I_2 + O_2 + 2\ OH^-$$

$$3\ O_3 + I^- \rightarrow IO_3^- + 3\ O_2$$

Ozonation : dosage de l'ozone dans un gaz

2. Dosage de l'ozone dans l'eau : méthode iodométrique

- L'ozone oxyde les ions iodure en diiode et en iodate

$$O_3 + 2\ I^- + H_2O \rightarrow I_2 + O_2 + 2\ OH^-$$

$$3\ O_3 + I^- \rightarrow IO_3^- + 3\ O_2$$

- Les ions iodate sont réduits en diiode par ajout de H_2SO_4

$$IO_3^- + 5\ I^- + 6\ H_3O^+ \rightarrow 3\ I_2 + 9\ H_2O$$

Equation globale

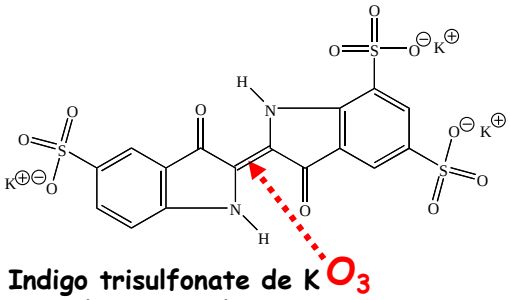
$$O_3 + 2\ I^- + H_2O \rightarrow I_2 + O_2 + 2\ OH^-$$

L'iode formé est ensuite dosé par une solution titrée de thiosulfate de sodium en présence d'un indicateur d'iode (thiodène, amidon, …)

$$I_2 + 2\ S_2O_3^{2-} \rightarrow 2\ I^- + S_4O_6^{2-}$$

Ozonation : dosage de l'ozone dans l'eau

Méthode spectrophotométrique à l'indigotrisulfonate de K



+ O_3 ⟶ décoloration

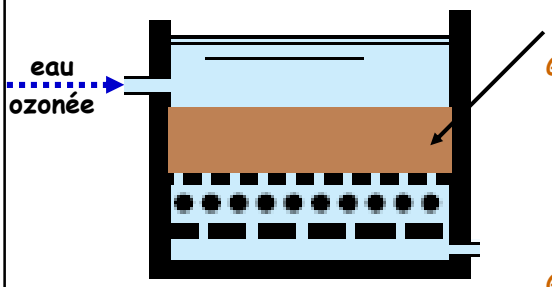
Indigo trisulfonate de K
= molécule colorée
qui absorbe à 600 nm

Diminution
de l'absorbance à 600 nm

Stoechiométrie de la réaction = 1 mole O_3/mole d'indigo
➔ Dosage quantitatif de l'ozone

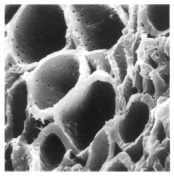
➔ Très bonne précision de cette méthode
➔ Faibles concentrations mesurables : $[O_3]$ > 10 µg/L

Filtration sur charbon actif en grains



Charbon actif en grains

Grains de 0,8-1 mm

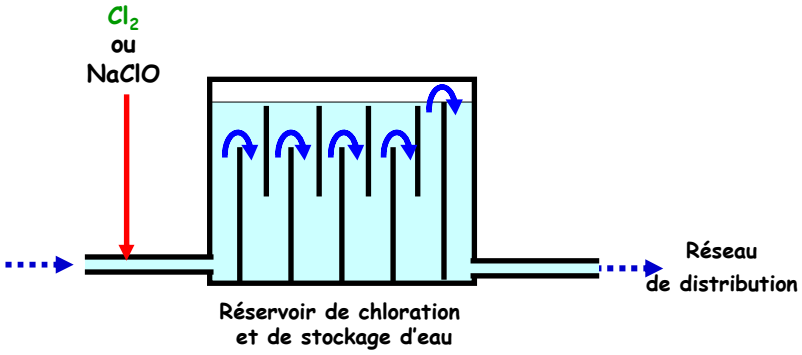


Grande porosité : 0,5 mL/g
Surface d'échange : 1000 m^2/g

Rôles du charbon actif en grains :

1. **Matériau adsorbant** ⇒ rétention des composés organiques à la surface du matériau
2. **Support pour le développement des bactéries** ⇒ oxydation des composés organiques biodégradables en CO_2

Désinfection par chloration



Objectifs de la chloration:

⇒ éliminer les microorganismes pathogènes (bactéries, virus, protozoaires, …)
⇒ garantir l'absence de tout germe pathogène dans les réseaux de distribution jusqu'au robinet du consommateur

Désinfection par chloration

Désinfectant : Cl_2 ou Hypochlorite de sodium

Injection de Cl_2

Injection de NaClO

$(Cl_2)_{gaz} \leftrightarrows (Cl_2)_{aq}$ Dissolution

$(Cl_2)_{aq} + 2\ H_2O \leftrightarrows HClO + Cl^- + H_3O^+$ Hydrolyse

Acide hypochloreux

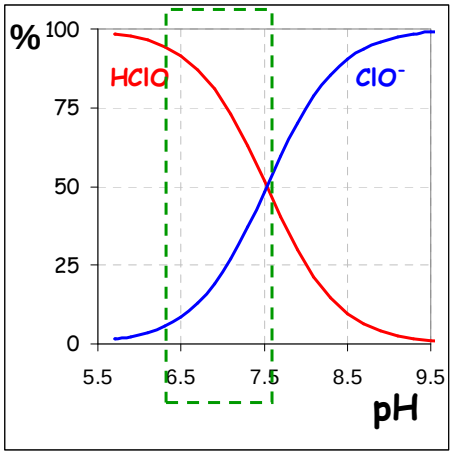
$HClO + H_2O \leftrightarrows ClO^- + H_3O^+$

Ion hypochlorite

pKa = 7,5 à 25°C

Désinfection par chloration

Répartition des formes HClO et ClO^- en fonction du pH (pKa = 7,5)



Pouvoir désinfectant : HClO >> ClO^-

⇒ pH utilisé pour la désinfection :
6,5 < pH < 7,5

Désinfection par le chlore

Pouvoir désinfectant: comparaison HClO/O_3

Oxydant	Bactéries	Virus
HClO	0,1 à 0,2 mg/L 10 à 15 min	0,3 à 0,5 mg/L 30 à 45 min
O_3	0,1 à 0,2 mg/L 1 à 2 min	0,4 mg/L 4 min

⇨ O_3 possède un pouvoir désinfectant plus puissant que HClO car O_3 est un oxydant plus puissant que HClO.

⇨ HClO a un pouvoir rémanent plus élevé que O_3 car il est moins rapidement consommé que O_3. La chloration permet d'assurer la désinfection de l'eau dans le réseau de distribution jusqu'au robinet du consammateur.

Désinfection par le chlore

Consommation rapide du chlore par les différents composés présents dans l'eau

Composés consommateurs de chlore

→ Germes pathogènes
bactéries, virus, parasites

→ Composés minéraux :
NH_4^+, Fe^{2+}, Mn^{2+}, NO_2^-, Br^-, CN^-, …

Exemples de réactions :

Le chlore oxyde les ions nitrite en nitrate

$$HClO + NO_2^- + H_2O \rightarrow NO_3^- + H_3O^+ + Cl^-$$

Le chlore oxyde les ions ferreux en ions ferriques

$$HClO + 2\ Fe^{2+} \rightarrow 2\ Fe^{3+} + Cl^- + OH^-$$

Désinfection par le chlore

Consommation rapide du chlore par les différents composés présents dans l'eau

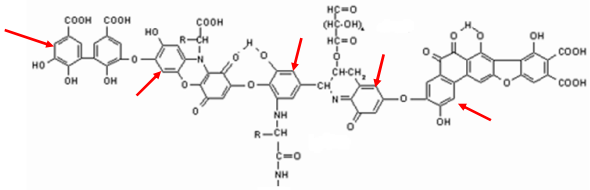
Composés consommateurs de chlore

- Germes pathogènes
  bactéries, virus, parasites
- Composés minéraux :
  NH_4^+, Fe^{2+}, Mn^{2+}, NO_2^-, Br^-, CN^-, …
- **Matière organique naturelle**

Désinfection par le chlore

Action sur la matière organique

Réactions du chlore sur certains sites très réactifs



Formation de sous-produits de chloration

Le développement d'outils analytiques de plus en plus perfectionnés a permis d'identifier à ce jour ≈ 600 sous-produits de chloration (du 1 ng/L à 100 µg/L)

- Chloroforme ($CHCl_3$)
- Acides chloroacétiques (CCl_3COOH, $CHCl_2COOH$)
- Dichloroacétonitrile ($CHCl_2CN$), …

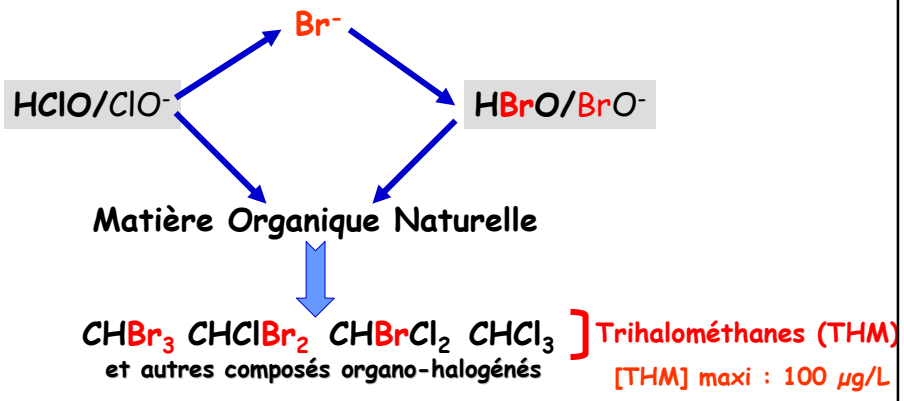
Désinfection par le chlore

Réactions en présence d'ions bromure

1. Oxydation des ions Br^-

$$HClO + Br^- \rightarrow HBrO + Cl^-$$

2. Formation de dérivés organohalogénés mixtes



Désinfection par le chlore

➢ **Dosage du chlore résiduel :**

1. Méthode iodométrique

Le chlore oxyde les ions iodure en diiode

$$Cl_2 + 2\ I^- \rightarrow I_2 + 2\ Cl^-$$

$$I_2 + 2\ S_2O_3^{2-} \rightarrow 2\ I^- + S_4O_6^{2-}$$

➔ Dosage de solutions concentrées

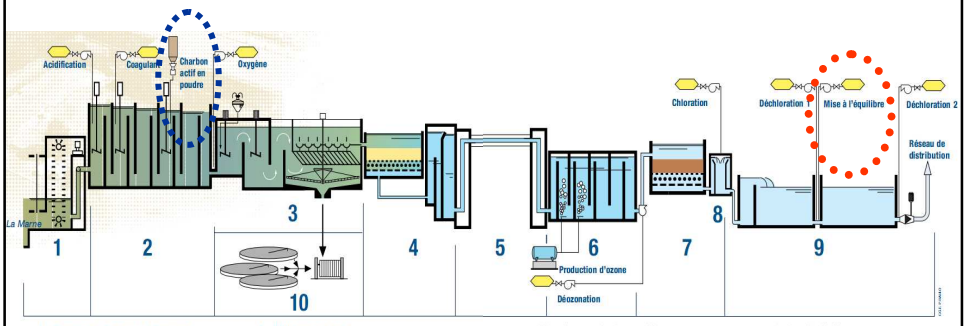
2. Méthode spectrophotométrique à la DPD

DPD = N,N-diéthylphénylène-1,4 diamine

Le chlore oxyde la DPD en un radical semi-quinonique
➔ dosage colorimétrique à 510 nm

➔ Méthode la plus adaptée pour le dosage du chlore résiduel

Traitements additionnels



1 - Dégrillage - Tamisage - Pompage
2 - Prétraitement
3 - Floculation Décantation

4 - Filtration sur sable
5 - Pont aqueduc
6 - Ozonation et Déozonation

7 - Filtration sur charbon actif
8 - Chloration
(et injection d'orthophosphates)

9 - Bassin d'effacement
10 - Traitement des terres de décantation

Ajout de charbon actif en poudre
= réactif de « crise »
➔ Adsorber des micropolluants organiques

Correction du pH
= équilibre calco-carbonique
➔ Éviter la corrosion
➔ Eviter l'entartrage

Le contrôle de la qualité de l'eau

Des contrôles quotidiens

Paramètres chimiques … et bactériologiques

Saveur de l'eau
➔ tests de dégustation quotidiens

Conclusion

Produire de l'eau potable à partir d'une eau de rivière

- ➔ **un défi majeur pour les traiteurs d'eau**
- ➔ **une filière de traitement complexe**
- ➔ **des procédés multiples**
- ➔ **des contrôles rigoureux** (qualité de l'eau)

➔ **nécessite des compétences multiples, et en particulier en chimie et en génie des procédés.**

Je vous remercie de votre attention

Remerciements:
Des schémas et les photographies présentés dans cette présentation ont été extraits de la plaquette de présentation de l'usine d'eau potable de Neuilly-sur-Marne/Noisy-Le-grand éditée par le Syndicat Des Eaux de l'Ile de France (SEDIF)

http://www.sedif.com/neuilly.aspx