

Capteurs et biocapteurs électrochimiques

**Daniel Thévenot, Régis Moillon
& Gilles Varrault, Cereve**

Université Paris 12, ENPC, ENGREF (UMR-MA 102)

<http://www.enpc.fr/cereve/HomePages/thevenot/thevenot.html>

**IUPAC commission I.7
de Chimie biophysique**



*Centre d'Enseignement
et de Recherche
Eau Ville Environnement*

Sommaire

- 1. Capteurs / électrodes métalliques (EM)**
- 2. Capteurs / électrodes spécifiques ioniques (ESI)**
- 3. Capteurs / électrodes spécifiques à gaz (ESG)**
- 4. Biocapteurs / électrodes à enzymes ou anticorps immobilisé(e)s**
- 5. Conclusions et perspectives**



4. Biocapteurs électrochimiques

■ Sommaire

4.1. Définition des biocapteurs

4.2. Classements des biocapteurs

4.3. Constituants des biocapteurs :
sélectivité et sensibilité, étape
cinétiquement limitante

4.4. Originalité des biocapteurs

4.5. Utilisation de biocapteurs en **milieux**
aquatiques : possibilités & limites

4.6. Conclusion et perspectives

4. Biocapteur : 4.1. Définition (IUPAC)

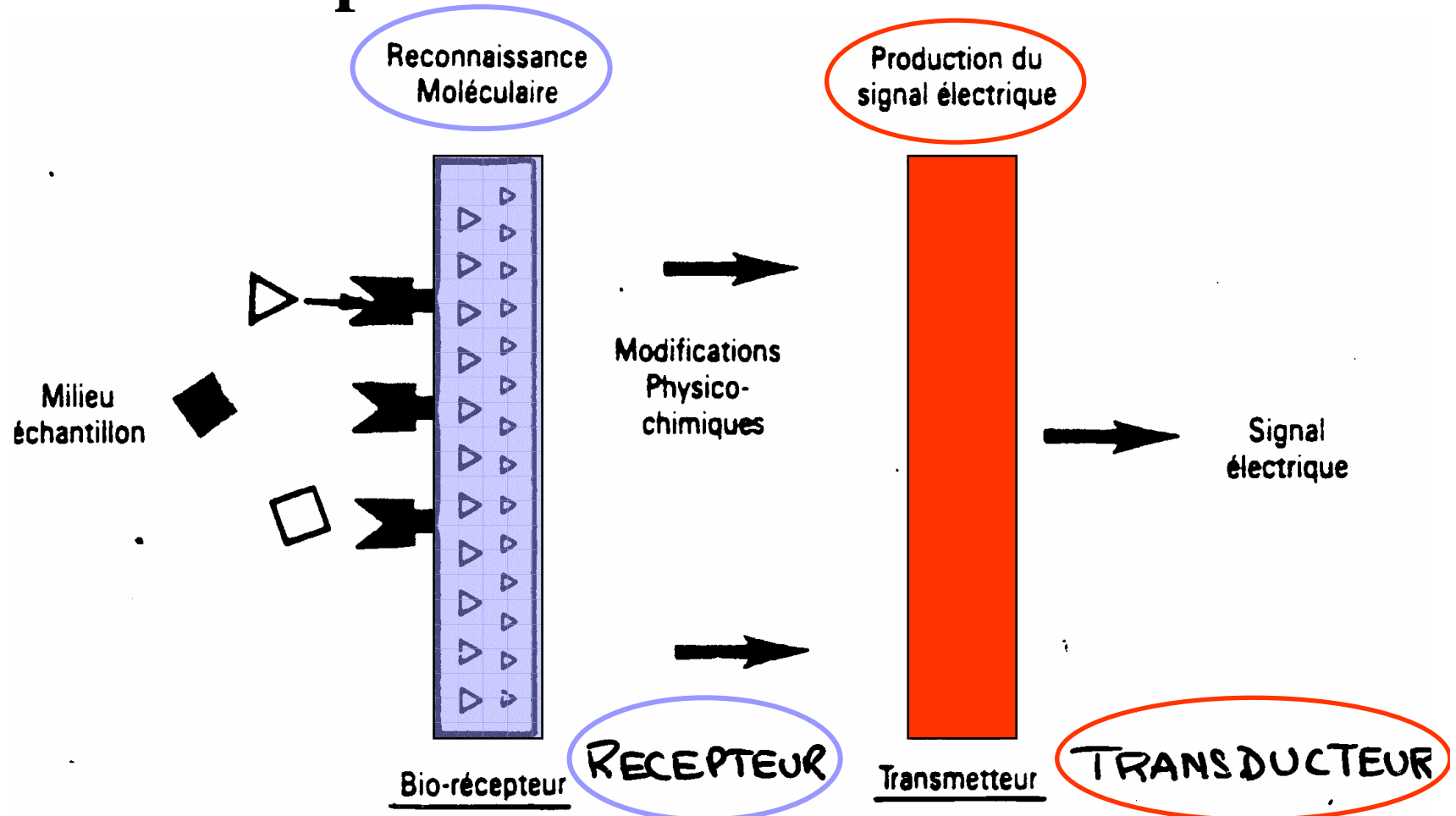
D.R. Thévenot, K. Toth, R.A. Durst & G.S. Wilson (1999) Electrochemical biosensors: recommended definitions and classification. **Pure and Applied Chemistry**, 71 (12), 2333-2348

- Self-contained, **integrated** device
- Nomenclature
 - **Biological** recognition element = **receptor**
 - **Physico-chemical** transducer = **transducer**
- Ability to be **repeatably calibrated**
 - either **continuous** operation
 - or rapidly and reproducibly **regenerated**



4. Biocapteur : 4.1. Définitions

■ Principe de fonctionnement &



4. Biocapteurs : 4.2. Classement

■ 4.2.1. Type de **reconnaissance moléculaire** (récepteur)

- **Catalyse** enzymatique, métabolisme cellulaire ou tissulaire
 - ◆ fonctionnement continu possible \Rightarrow véritable capteur !
 - ◆ enzyme purifié ou présent dans des cellules ou tissus
 - ◆ oxydases, déshydrogénases, hydrolases...
- Formation de **bio-complexe**: réaction immunologique, récepteur membranaire
 - ◆ nécessité **d'amplification** (enzyme, fluorescence...) et de **régénération** (pour fonctionnement séquentiel)



4. Biocapteurs : 4.2. Classement

■ 4.2.1. Type de **reconnaissance moléculaire** (suite)

- Mode de **fonctionnement** des membranes
 - ◆ Catalytiques : fonctionnement **continu**
 - ◆ Chélatantes : nécessité de **régénération**
- Caractère commun entre les 2 types de membranes à reconnaissance biologique
 - ◆ **Consommation** (locale) de l'espèce mesurée : mesure **stationnaire** (si agitation) ou **transitoire**

4. Biocapteurs : 4.2. Classement

■ 4.2.2. Type de **transducteur** associé

- **Electrochimique**

- ◆ ampérométrique, potentiométrique, conductimétrique, FET

- **Optique**

- ◆ optrode, résonance de plasmon de surface (SPR)

- **Enthalpimétrique**

- ◆ micro-calorimétrie

- **Massique**

- ◆ quartz piézo-électriques, ondes acoustiques de surface

4. Biocapteurs : 4.2. Classement

■ 4.2.3. Classement par espèce(s) détectée(s)

- **Substrats** de réactions biologiques
 - ◆ sucres, acides aminés, alcools, phénols...
- **Nutriments**
 - ◆ micro-DBO
- **Inhibiteurs**, toxiques
 - ◆ pesticides (organo-phosphorés), métaux, fluorures...



4. Biocapteurs : 4.2. Classement

■ Que retenir ?

- 1. Type de reconnaissance moléculaire
 - ◆ Catalytique: enzyme(s)
 - ◆ Chélatante: complexe antigène-anticorps
 - ◆ Dans les 2 cas: consommation de substrat
- 2. Type de transducteur
 - ◆ Ampérométrique
 - ◆ Potentiométrique
- 3. Type d'espèce détectée
 - ◆ Substrat
 - ◆ Nutriment
 - ◆ Toxique

[Retour au sommaire biocapteur](#)



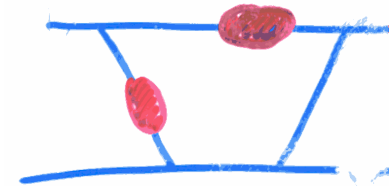
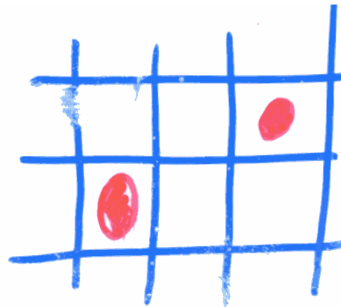
4. Biocapteurs : 4.3. Constituants

- 4.3.1. Mode **d'immobilisation** du récepteur dans/sur la membrane
 - Emprisonnement ou inclusion : *facile, ± stable*
 - ◆ gel ou membrane préparée en présence d'enzyme(s)
 - Adsorption du membrane : *facile & peu stable*
 - Liaison covalente, réticulation sur membrane : *± complexe mais stable*
 - ◆ activation de la membrane, activation de l'enzyme et réaction spontanée
 - ◆ contact d'enzyme avec une membrane activée
- **Stabilité** de l'activité de la membrane
 - 3 éléments: membrane + liaison + activité enzyme

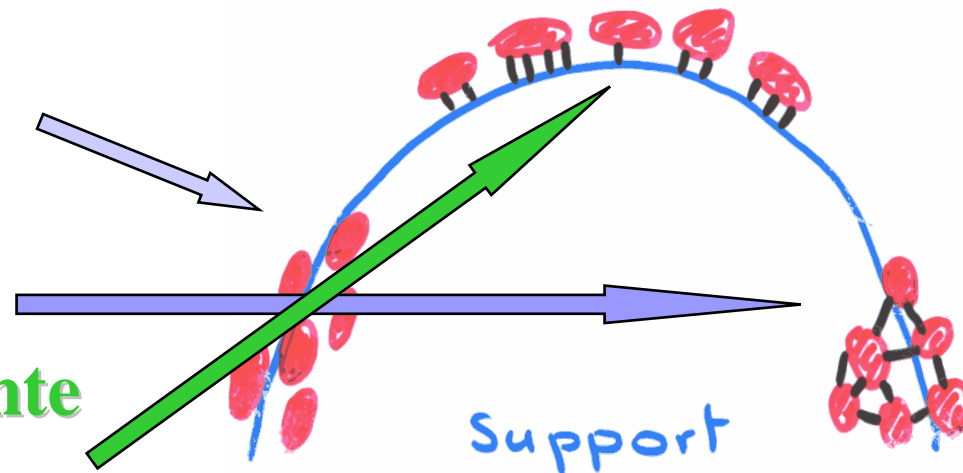
4. Biocapteurs : 4.3. Constituants

4.3.1. Mode **d'immobilisation** du récepteur dans/sur la membrane

- Inclusion dans gel ou co-polymérisation

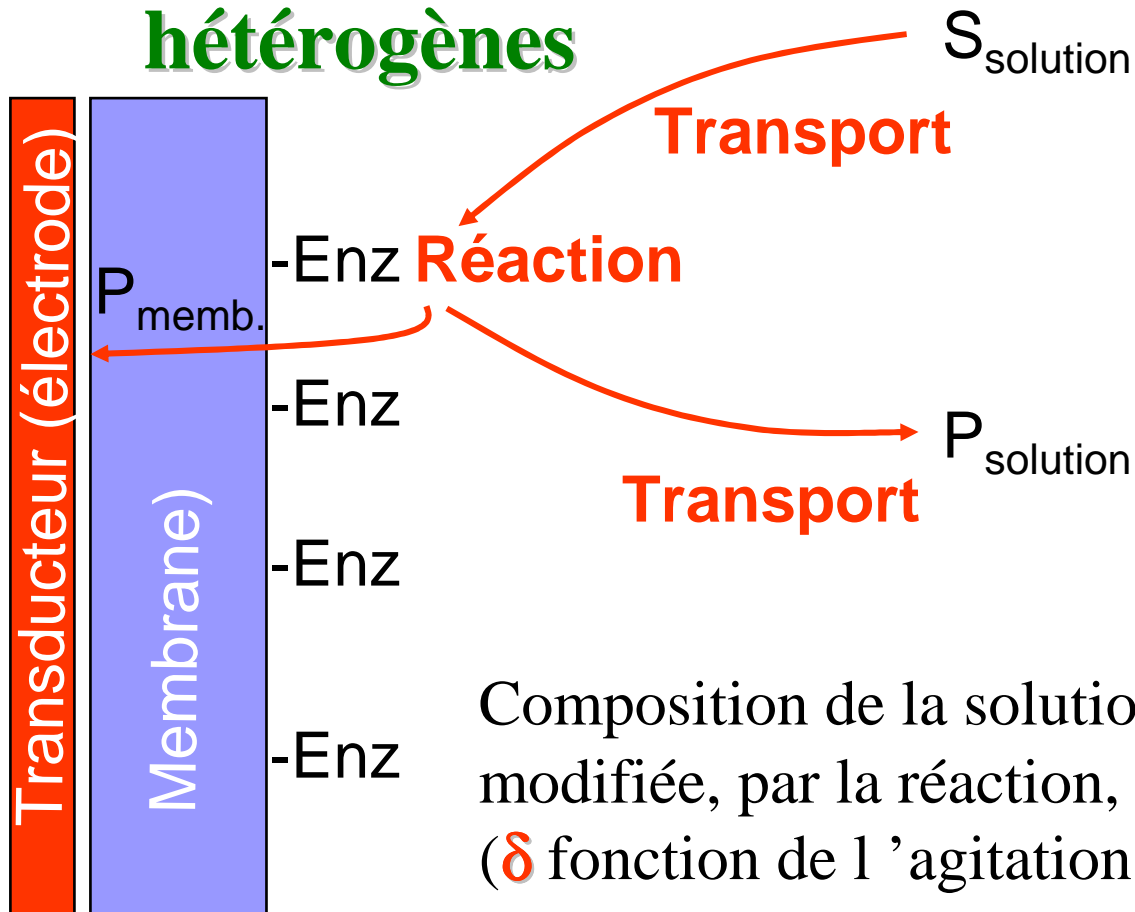


- Adsorption
- Adsorption & réticulation
- **Liaison covalente**



4. Biocapteurs : 4.3. Constituants

■ 4.3.2. Rôle des cinétiques enzymatiques hétérogènes



S: substrat(s)
P: produit(s)
de la réaction
catalysée par
l'enzyme

Composition de la solution analysée
modifiée, par la réaction, sur une **épaisseur δ**
(δ fonction de l'agitation de la solution)

4. Biocapteurs : 4.3. Constituants

■ 4.3.2. Rôle des **cinétiques enzymatiques hétérogènes**

- **Transport** du/des substrat(s) S vers le site réactionnel (surface ou intérieur membrane)

$$V = (D_S / \delta) (S_{\text{solution}} - S_{\text{membrane}})$$

avec $\delta \searrow$ si agitation \nearrow

- ◆ avec D_S diffusion substrat S et δ épaisseur couche modifiée

- **Réaction** du/des substrat(s) S catalysée par l'enzyme

$$V = V_{\text{max}} \cdot S_{\text{membrane}} / (S_{\text{membrane}} + K_{M,S})$$

- ◆ avec V_{max} activité enzymatique et $K_{M,S}$ (Michaelis)
- ◆ **transport** de partie du/des produits P vers le transducteur (*réponse*) et vers l'échantillon (inutile)

4. Biocapteurs : 4.3. Constituants

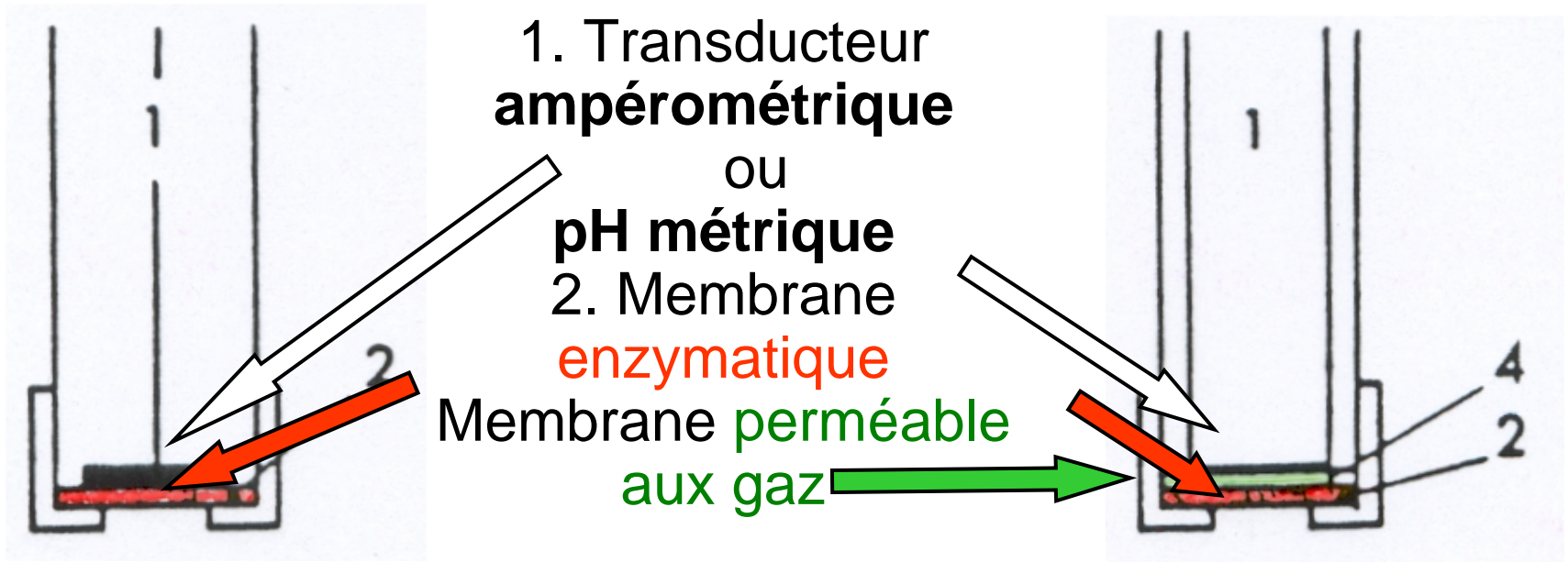
■ 4.3.2. Rôle des **cinétiques enzymatiques hétérogènes**

- Quelle étape la plus lente : **cinétiquement limitante**? **Transport** ou **réaction** ?
- Régime **diffusionnel** si transport = étape la + lente
 - ◆ $V_{\max} / K_{M,S} \gg D_S / \delta$
 - ◆ forte activité immobilisée V_{\max} et/ou barrière diffusionnelle externe (D_S faible)
 - ◆ réponse ‘ **indépendante** ’ de l’activité immobilisée
⇒ **TB!**
- Régime **chimique** si réaction = étape la + lente
 - ◆ $V_{\max} / K_{M,S} \ll D_S / \delta$
 - ◆ faible activité immobilisée et/ou forte agitation ($\delta \searrow$)
 - ◆ réponse ‘ **dépendante** ’ de l’activité immobilisée => **peu souhaitable** pour instrumentation analytique !

4. Biocapteurs : 4.3. Constituants

4.3.3. Transducteur électrochimique associé

- Electrode métallique : H_2O_2 , $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3/4-}$...
- Electrode spécifique ionique : H_3O^+ , NH_4^+ ...
- Electrode spécifique à gaz : O_2 , CO_2 , NH_3 ..



4. Biocapteurs : 4.3. Constituants

■ Que retenir ?

- **1. Immobilisation du récepteur (enzyme)**
 - ◆ Inclusion ou rétention
 - ◆ Adsorption: peu stable
 - ◆ Liaison covalente: stable mais plus complexe
- **2. Cinétiques hétérogènes**
 - ◆ Régime chimique: cinétique enzymatique limitante
 - ◆ Régime diffusionnel: transport du substrat limitant (permet une plus grande stabilité du capteur)
- **3. Transducteur électrochimique**
 - ◆ EM (H_2O_2), ESI (pH) ou ESG (Clark, CO_2 , NH_3 ...)

[Retour au sommaire biocapteur](#)

4. Biocapteurs : 4.4. Originalité

4.4.1. **Sélectivité**: détecteur & transducteur

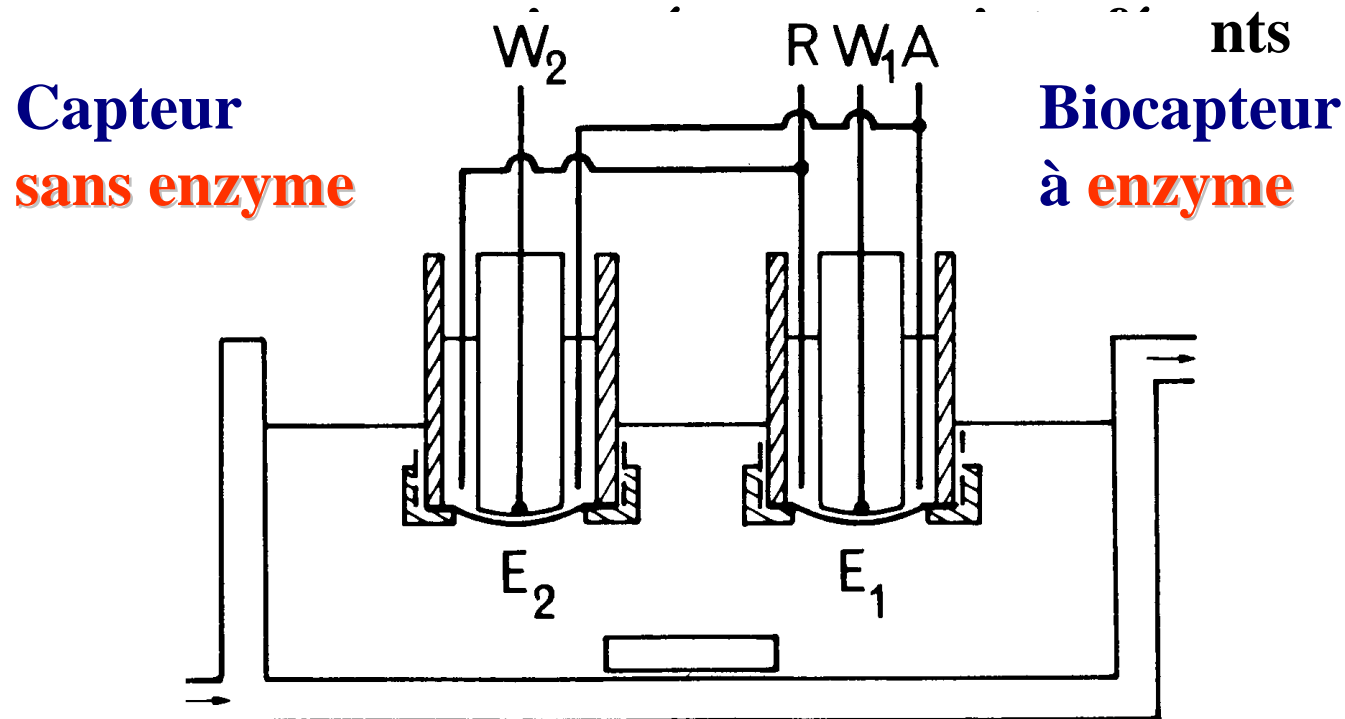
- Catalyse enzymatique: *très / peu sélective*
 - ◆ glucose oxydase, alcools oxydase, amino-acides oxydase
 - ◆ enzyme(s) purifié ou cellule / tissus biologique
- Anticorps mono- ou multi-clonal: *très/peu sélective*
- Transducteur associé: *très / peu sélectif*

4.4.2. Amélioration de la **sélectivité**

- Montage **différentiel** à 2 capteurs (\approx colorimétrie)
- Membrane sélective **supplémentaire**
 - ◆ acétate de cellulose (anionique): arrêt de l'ascorbate
- Transducteur **électrochimique**: $E_{\text{appl.}}$ + faible
 - ◆ utilisation de catalyseurs supplémentaires

4. Biocapteurs : 4.4. Originalité

- 4.4.2. Amélioration de la **sélectivité**
 - Montage **différentiel** : soustraction des réponses



4. Biocapteurs : 4.4. Originalité

- 4.4.3. **Sensibilité** plus élevée que si réaction homogène (dosage par kit enzymatique)
 - **Intégration** de la reconnaissance moléculaire et de la transduction du/des produits de la réaction
 - ◆ pas de dilution dans l'échantillon
 - **Amplification** de la réaction principale à l'aide de réaction supplémentaire
 - ◆ utilisation de seconde réaction enzymatique

4. Biocapteurs : 4.4. Originalité

■ 4.4.4. **Stabilité**: méthodes d'évaluation

- Stabilité **opératoire** (fonctionnelle)
 - ◆ même biocapteur, calibration séquentielle
- Stabilité au **stockage**
 - ◆ différent biocapteurs issus d'un même lot (homogène) de production
- **Dépend** de: membrane, enzyme, immobilisation
- **Durée de vie**: modes d'expression
 - ◆ Durée (quelques heures à quelques mois)
 - 50 % de décroissance de la sensibilité : $t_{1/2}$
 - soit en **fonctionnement** soit au **stockage**
 - ◆ Vitesse de **décroissance de la sensibilité** : **%/mois**

4. Biocapteurs : 4.4. Originalité

■ Que retenir ?

- **1. Spécificité ou sélectivité du capteur**
 - ◆ **Spécificité ou sélectivité enzymatique**
 - Molécule: glucose oxydase, uréase
 - Famille: alcool oxydase
 - ◆ **Spécificité ou sélectivité du transducteur**
- **2. Amélioration de la sélectivité**
 - Montage différentiel
 - Membrane permsélective
- **3. Sensibilité élevée**
 - ◆ **Intégration spatiale du détecteur et transducteur**

4. Biocapteurs : 4.4. Originalité

■ Que retenir ?

● 4. Stabilité

◆ Modes d'évaluation à bien définir

- Au stockage ou en fonctionnement

◆ Dépend de tous les constituants du capteur et du régime cinétique utilisé

- Diffusionnel vs. chimique

◆ Durée d'utilisation comprise entre

- 1 semaine: dispositifs de recherche
- Plusieurs années: dispositifs commercialisés

[Retour au sommaire biocapteur](#)



4. Biocapteurs : 4.5. Applications

■ 4.5. **Application** des biocapteurs électro-chimiques

● 4.5.1. Mesure de **substrats** :

◆ urée, sucres, acides aminés, phénols...

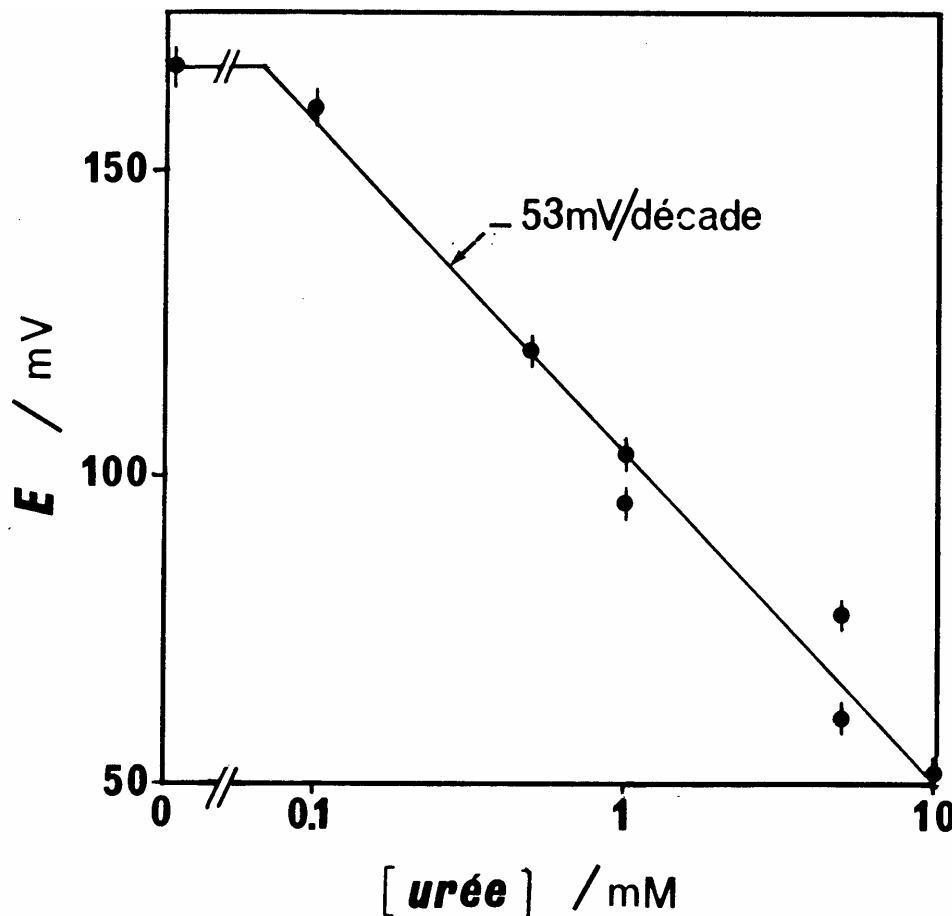
◆ 4.5.2. Exemple de **biocapteur à urée**

● Mesure de matière oxydable

● Mesure d'inhibiteurs enzymatiques

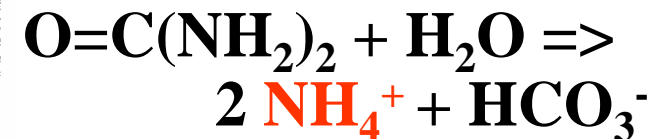
4. Biocapteurs : 4.5.2. Urée

■ 4.5.2. **Uréase** immobilisé & détecteur NH_3



- Réponse stationnaire

$\Delta E = \text{pente} \cdot \log [\text{urée}]$



- NH_4^+ détecté via NH_3

- pH optimal **compromis**:

- pH = 7 pour uréase

- pH > 9,2 détection NH_3

- **Agitation** nécessaire pour réponse **stationnaire**

- **Remplissage** du biocapteur

4. Biocapteurs : 4.5. Applications

■ 4.5. **Application** des biocapteurs électro-chimiques

- 4.5.1. Mesure de **substrats** :

- ◆ 4.5.2 Exemple de biocapteur à urée

- ◆ 4.5.3. Exemple de **biocapteur à glucose**

- Mesure de matière oxydable

- Mesure d'inhibiteurs enzymatiques



4. Biocapteurs : 4.5 3. Glucose

■ 4.5.3.1. Réaction enzymatique

- **β D Glucose oxydase (GOD ou GOx)**
immobilisée



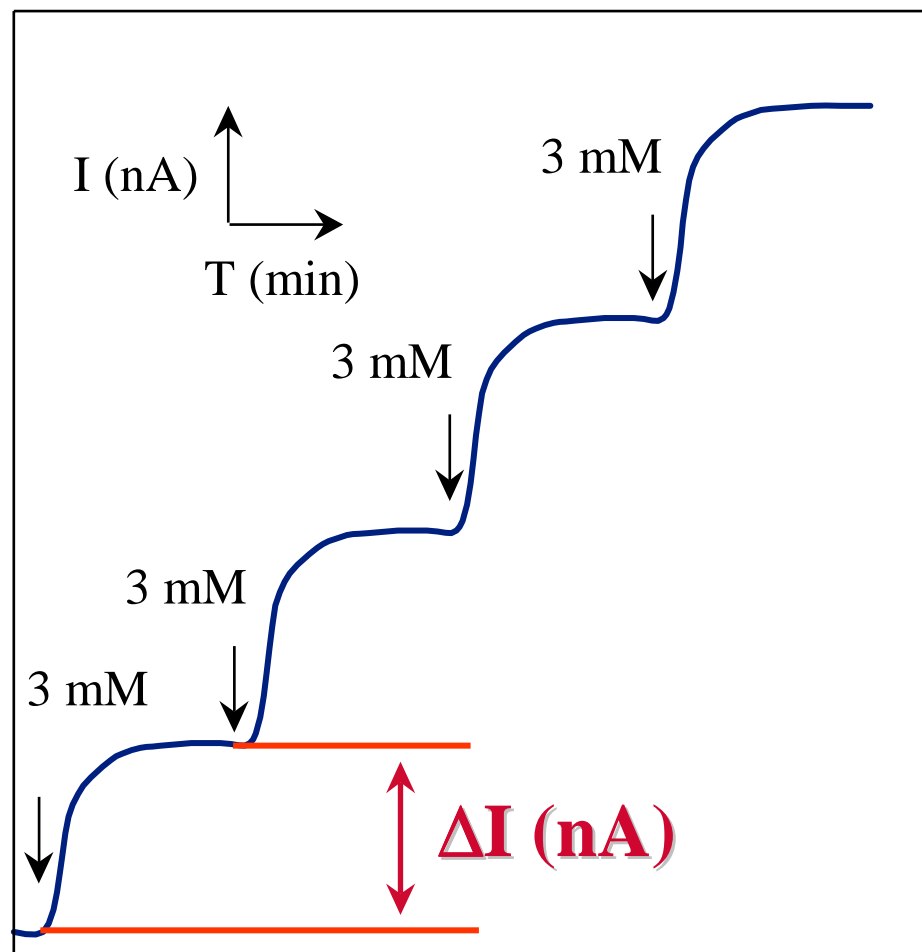
- $K = 9,3 \cdot 10^{23}$ à pH 5,7 \Rightarrow **réaction totale** (si GOx présent et actif)!

4. Biocapteurs : 4.5 3. Glucose

■ 4.5.3.2. Transducteurs associés : 3 possibilités

- Capteur de **pH** : non spécifique au gluconate
- Capteur à **oxygène** : très spécifique, mais réponse décroît si glucose ↗
- Capteur métallique (Pt) **oxydation H_2O_2** : peu spécifique à H_2O_2 mais réponse ↗ avec glucose
- **Conditions de fonctionnement** du capteur
 - ◆ Milieu à pH neutre (sang à pH 7,2)
 - ◆ Présence d'oxygène dissous

4. Biocapteurs : 4.5.3. Glucose

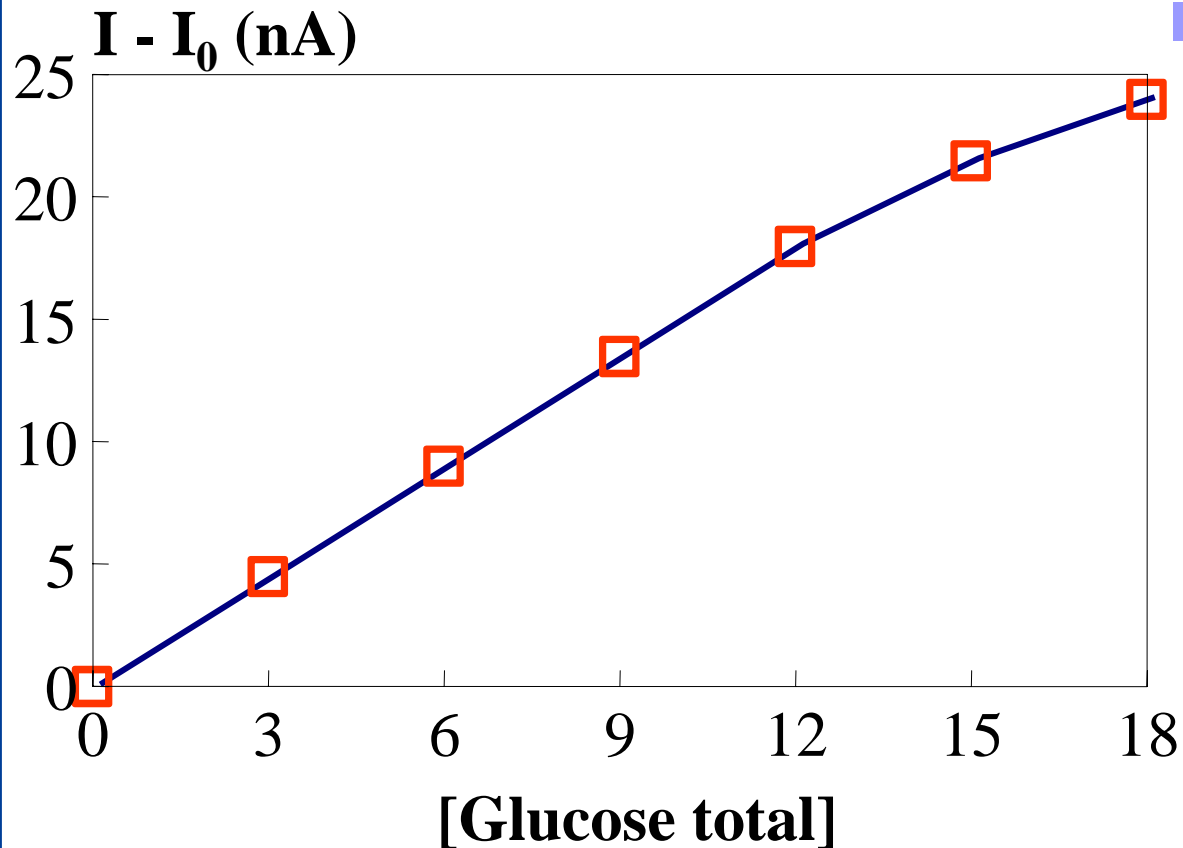


■ 4.5.3.3.

Calibration

- Électrode de Pt: oxydation de H_2O_2
- Réponses à des **additions de glucose 3 mM** dans une solution tampon (pH 7,4)
- Mesures des **réponses stationnaires ΔI**

4. Biocapteurs : 4.5.3. Glucose



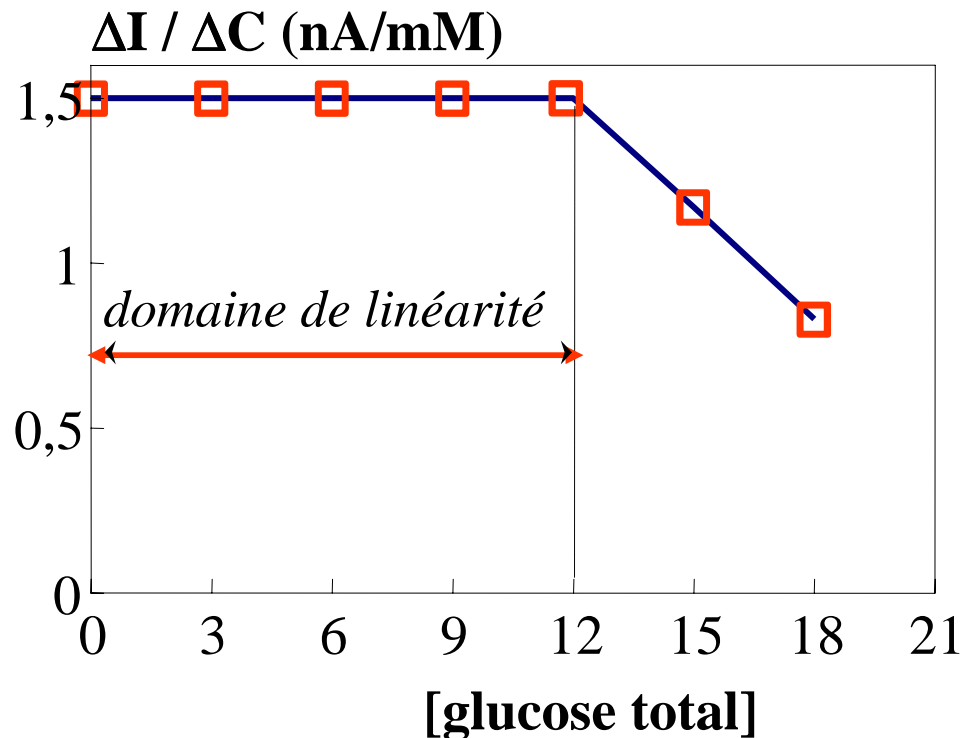
■ 4.5.3.3. **Calibration** des réponses stationnaires du biocapteur :

$$I - I_0 = f(\text{glucose})_{\text{total}}$$

- Soustraction du signal de fond I_0
- Quel **domaine de linéarité** ?

4. Biocapteurs : 4.5.3. Glucose

■ 4.5.3.3. Calibration

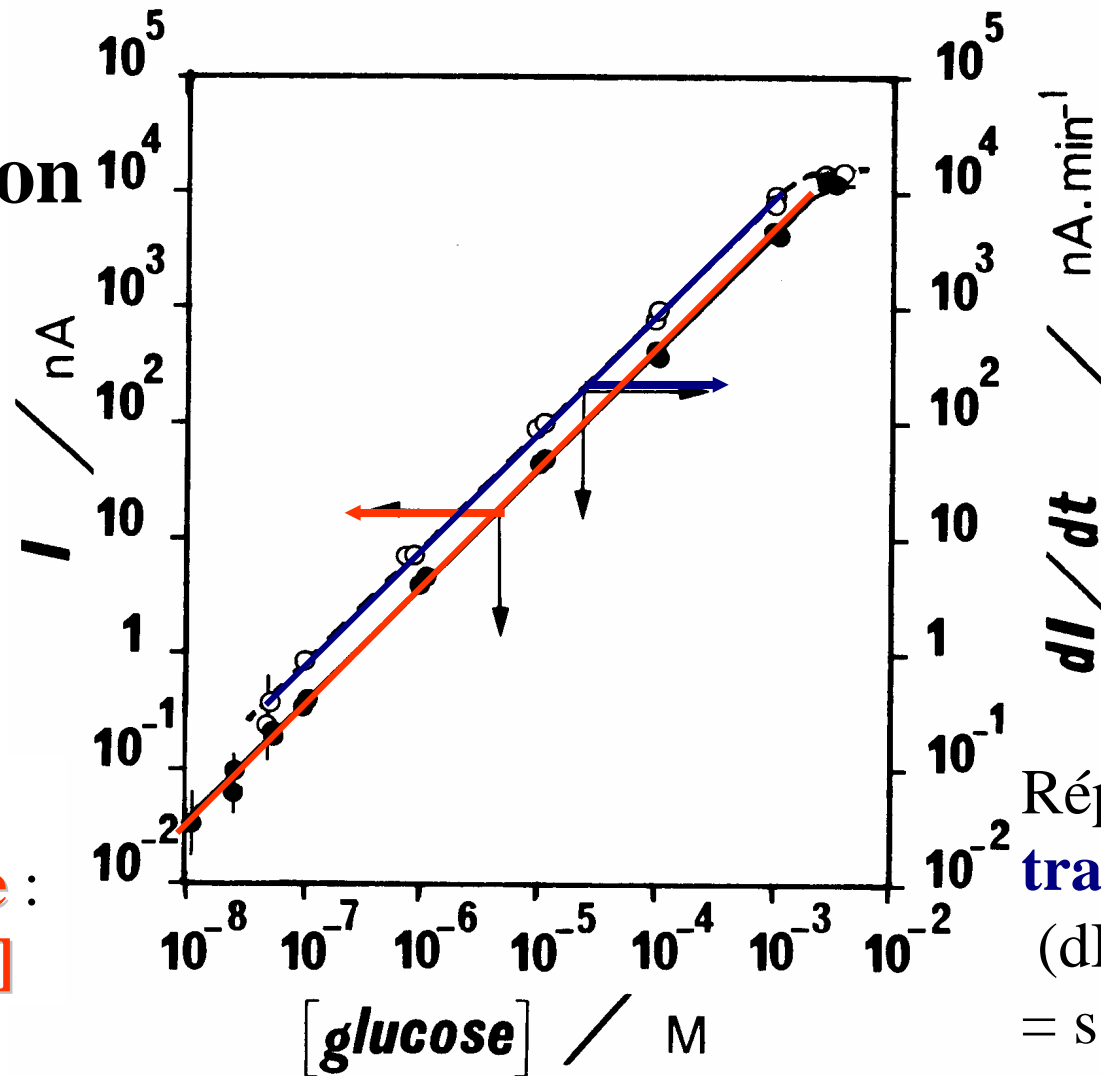


- Sensibilité stationnaire (**réponse relative**) = $\Delta I / \Delta C$
- Domaine de linéarité de la réponse lorsque $\Delta I / \Delta C = \text{constante}$
- $[\text{glucose}]_{\text{max}}$ indicateur de **l'étape cinétiquement limitante**
 - ◆ Ici **diffusion** du glucose vers le site réactionnel (membrane à GOx)

4. Biocapteurs : 4.5.3. Glucose

4.5.3.3. Calibration

Réponse
stationnaire :
 $I_{\text{stat.}} = s [\text{glu}]$



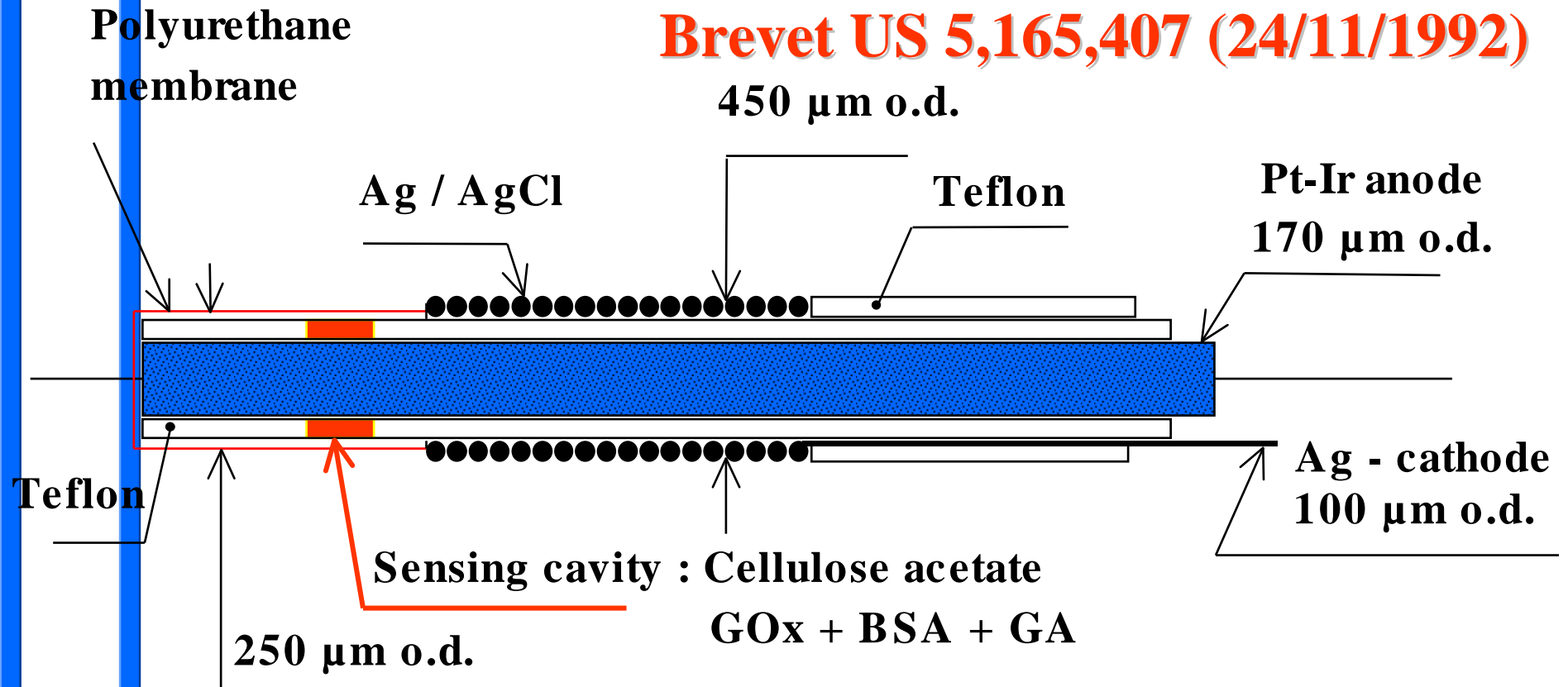
Réponse
transitoire:
 $(dI/dt)_{\text{max.}}$
 $= s [\text{glu}]$



4. Biocapteurs : 4.5.3. Glucose

■ 4.5.3.4. Biocapteur implantable (KU, Paris 12, INSERM)

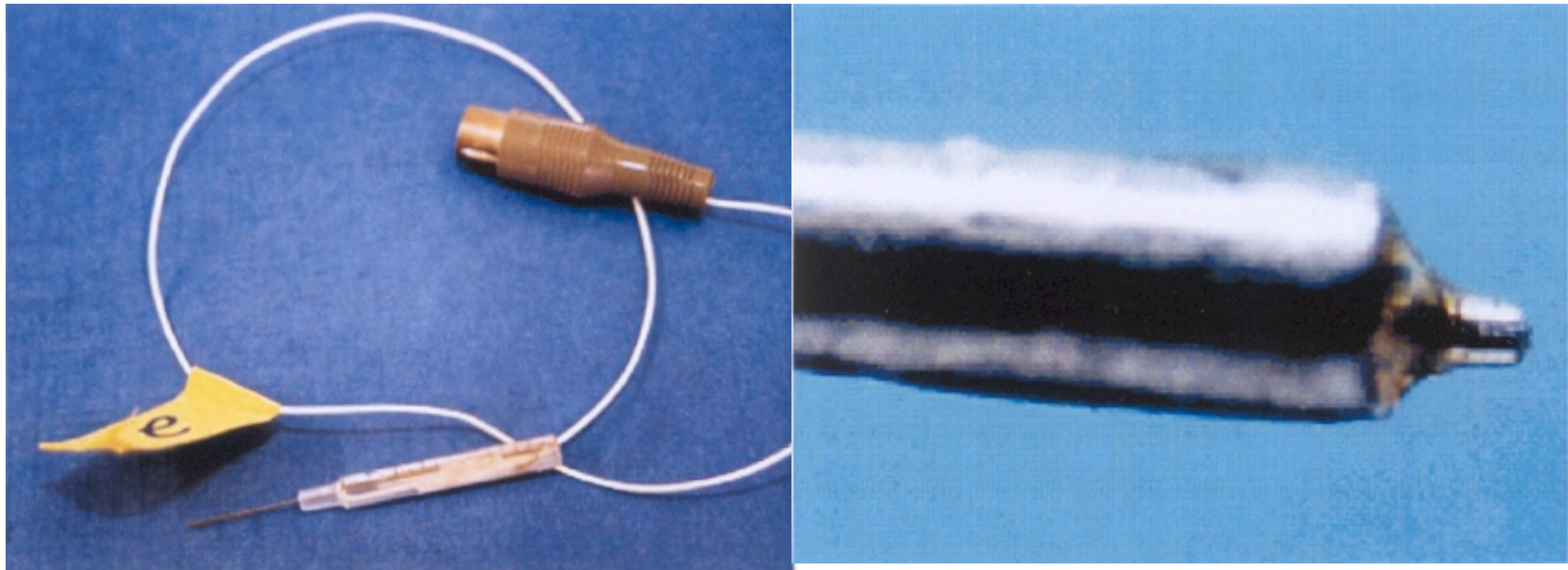
Brevet US 5,165,407 (24/11/1992)



4. Biocapteurs : 4.5.3. Glucose

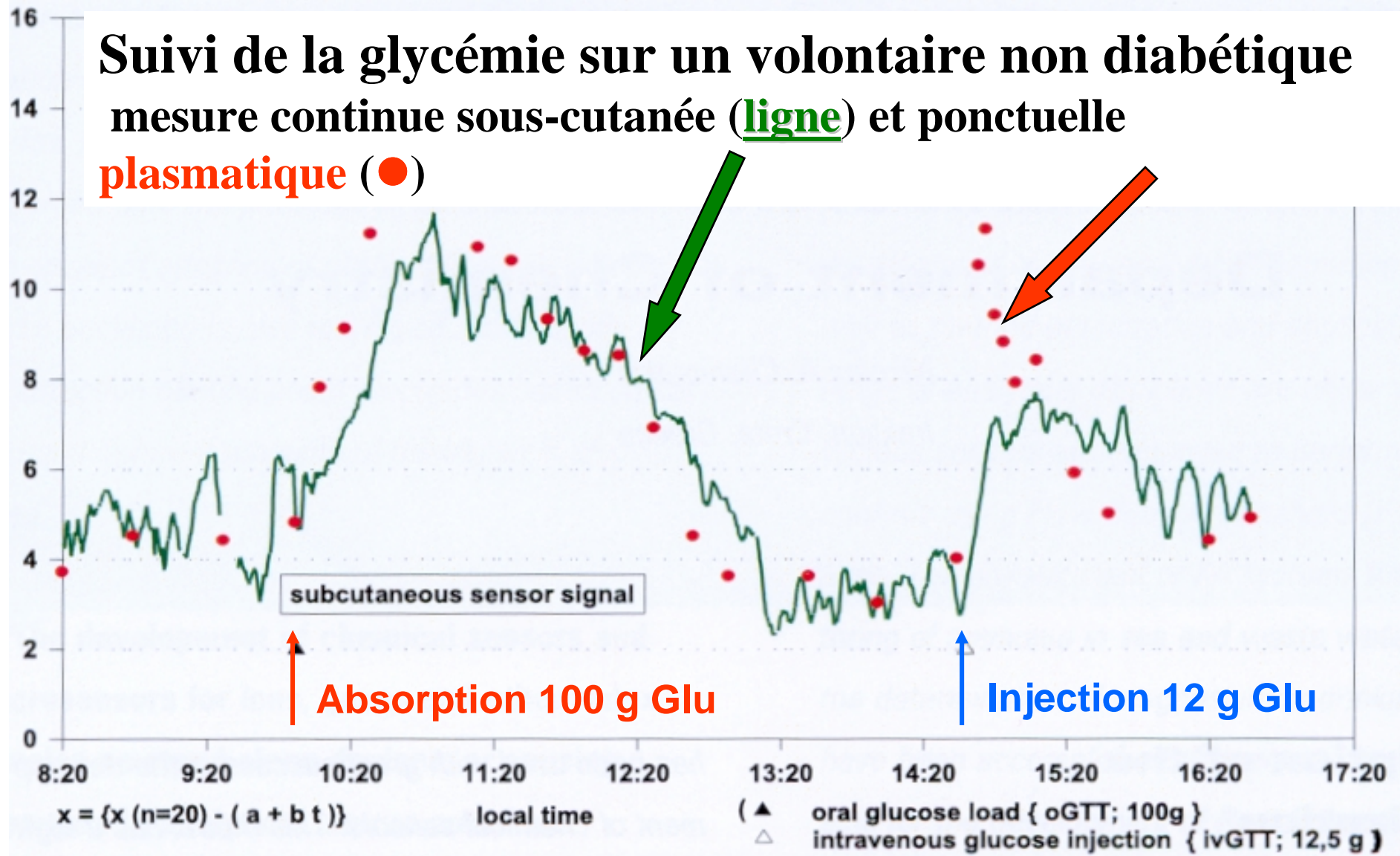
■ 4.5.3.4. Biocapteur implantable (Université de Manchester)

- **capteur** **extrémité** (anode de Pt 125 μm)
et électrode auxiliaire / référence en acier inox



4. Biocapteurs : 4.5.3. Glucose

Suivi de la glycémie sur un volontaire non diabétique
mesure continue sous-cutanée (ligne) et ponctuelle
plasmatique (●)



4. Biocapteurs : 4.5.3. Glucose

■ 4.5.3.4. Biocapteur jetable (**MediSense**)

- Languette à usage unique avec zone d'insertion-aspiration de la goutte de sang



4. Biocapteurs : 4.5.1. Substrats

■ Que retenir ?

- **Biocapteurs à substrats: les plus étudiés, publiés, brevetés, commercialisés**
- **Marché agro-alimentaire mais surtout médical**
 - ◆ **Diabète = maladie touchant une part importante de la population et entraînant des problèmes importants: reins, vision...**
 - ◆ **Nécessite la mesure multi quotidienne de la glycémie sanguine (pour injection d'insuline)**
 - ◆ **2 approches complémentaires**
 - Capteur à usage unique
 - Capteur implanté in vivo

4. Biocapteurs : 4.5.1. Substrats

■ Que retenir ?

- **Multiplicité de transducteurs électrochimiques possibles**
 - ◆ Eau oxygénée produite
 - ◆ Oxygène consommé
- **Bonne stabilité (conservation et fonctionnement) de la glucose oxydase**
 - ◆ Possibilité de commercialisation de capteurs à usage unique (sans étalonnage par usager)
- **Développements industriels et scientifiques**

4. Biocapteurs : 4.5. Applications

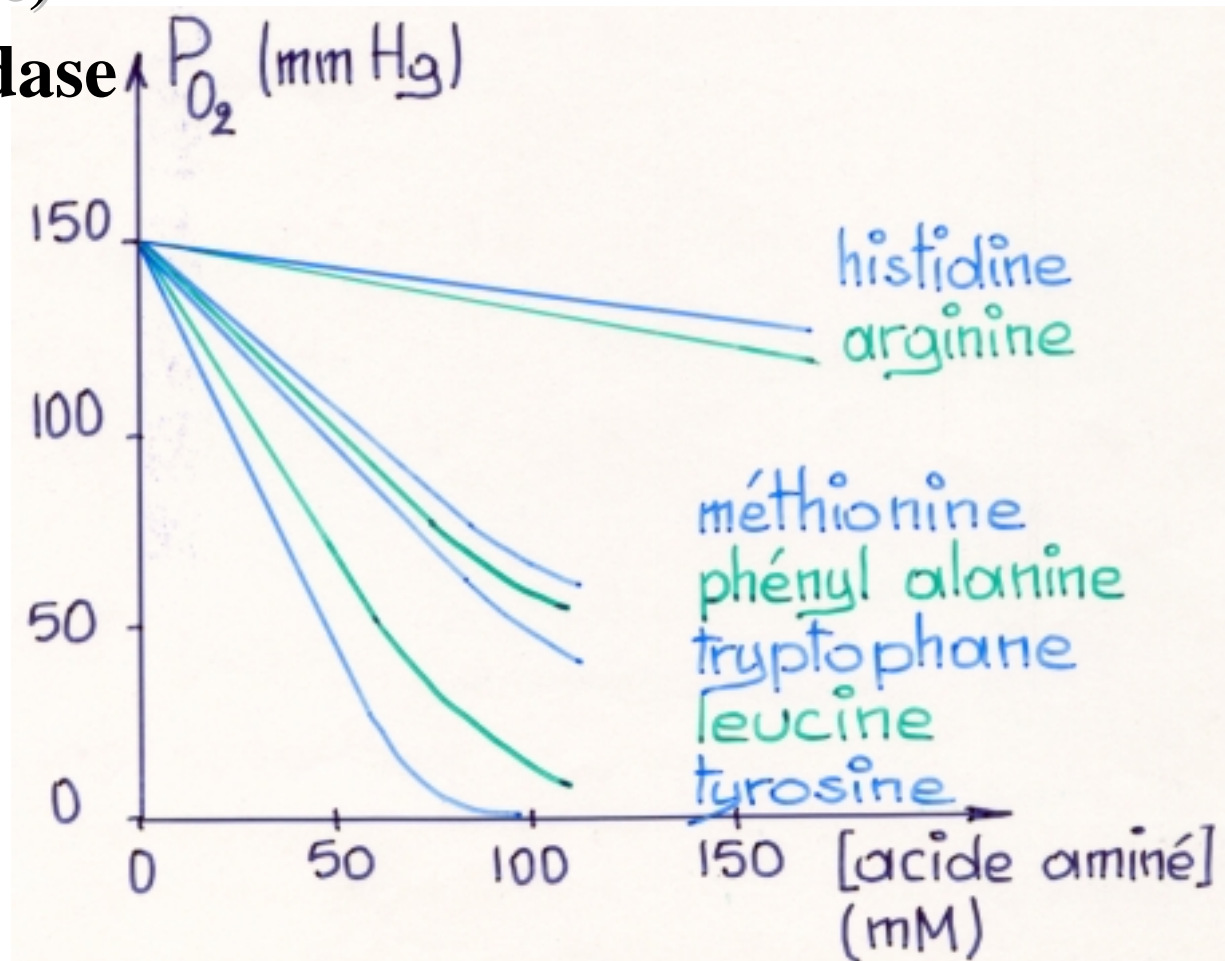
- 4.5. **Application** des biocapteurs électro-chimiques
 - 4.5.1. Mesure de **substrats**
 - ◆ 4.5.2. Exemple de biocapteur à urée
 - ◆ 4.5.3. Exemple de biocapteur à glucose
 - 4.5.4. Exemple de mesure d'**acide aminé** et **métabolites**
 - Mesure de matière oxydable
 - Mesure d'inhibiteurs enzymatiques



4. Biocapteurs : 4.5.4. Métabolites

■ 4.5.4. Capteur à **L aminoacides** (spécifique d '1 famille)

- a.a oxydase
- capteur à O_2
- courbes de calibration à différent aminoacides



4. Biocapteurs : 4.5.4. Métabolite



dispositif de mesure ponctuelle



dispositif d'analyse à circulation

SensLab GmbH, Leipzig (alcool, glucose, lactate, glutamate)

4. Biocapteurs : 4.5. Applications

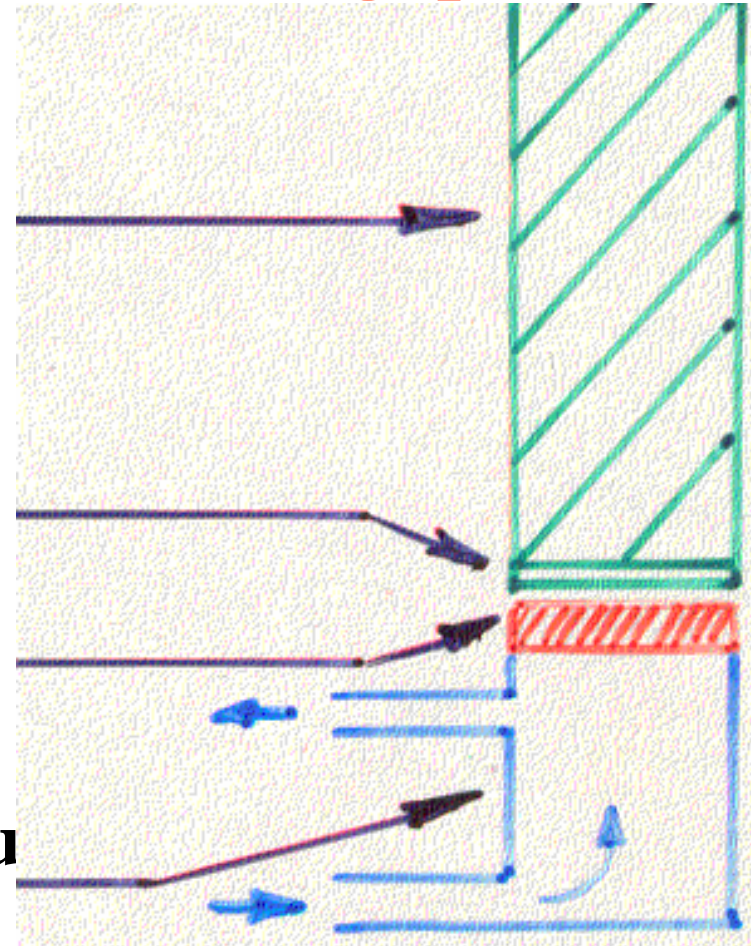
■ 4.5. **Application** des biocapteurs électro-chimiques :

- 4.5.1. Mesure de substrats
- 4.5.4 Mesure de métabolites
- 4.5.5. Mesure de **matière oxydable** (levure immobilisée) :
 - ◆ **Micro-DBO**: capteur à demande biologique en oxygène
- Mesure d'inhibiteurs enzymatiques

4. Biocapteurs : 4.5.5. DBO

■ 4.5.5. Capteur à **Demande Biologique en Oxygène (DBO)**

- Capteur à O_2 avec membrane en téflon
- Levures immobilisées dans une **membrane**
- **Echantillon aéré** : circulation



4. Biocapteurs : 4.5.5. DBO

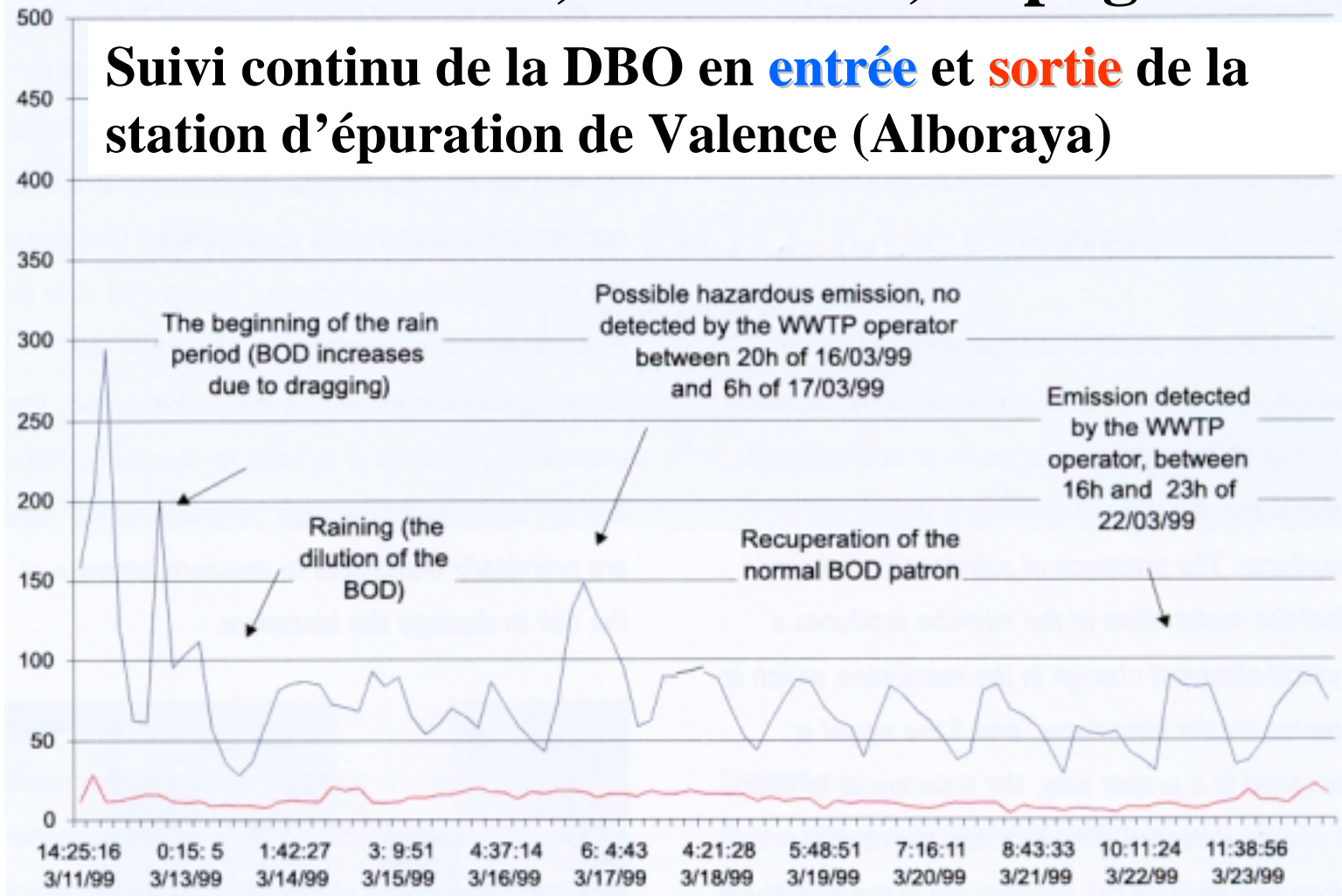
- **Biosensores SL, Moncofar, Espagne**
 - **Suivi du fonctionnement de stations d'épuration**



4. Biocapteurs : 4.5.5. DBO

■ Biosensores SL, Moncofar, Espagne

Suivi continu de la DBO en **entrée** et **sortie** de la station d'épuration de Valence (Alboraya)



4. Biocapteurs : 4.5. Applications

- 4.5. **Application** des biocapteurs électrochimiques
 - 4.5.1. Mesure de substrats
 - 4.5.4 Mesure de métabolites
 - 4.5.5. Mesure de matière oxydable
 - 4.5.6. Mesure **d'inhibiteurs** enzymatiques
 - ◆ Pesticides, métaux lourds, fluorures...
 - ◆ Intérêt environnemental: soutien Européen
 - ◆ Exemple de biocapteur à pesticides



4. Biocapteurs : 4.5.6. Pesticides

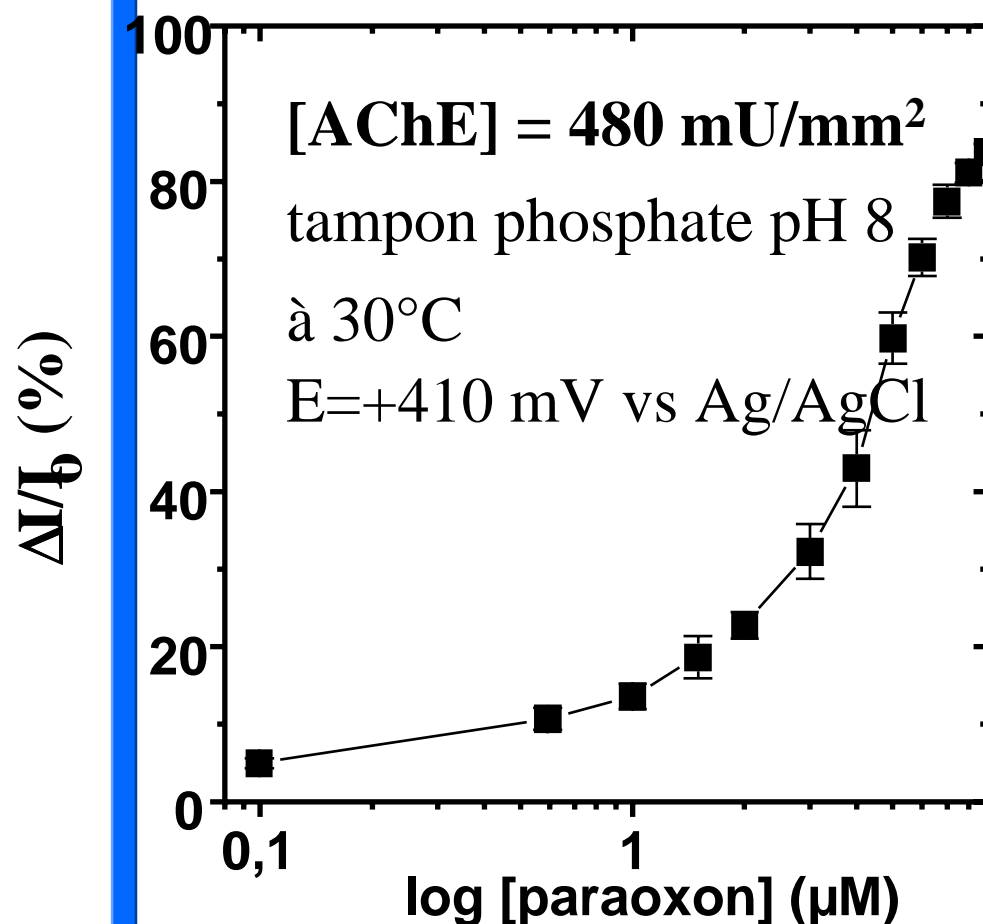
- 4.5.6.1. Importance de la mesure des **pesticides**
 - Contrôle de la qualité des eaux (réglementation Européennes)
- 4.5.6.2. Toxicité des pesticides en relation avec leur **inhibition** de l' **AChE**
- 4.5.6.3. Développement de biocapteur **miniaturisé à AChE** pour leur mesure dans échantillons aqueux ou organiques (**G. Turdean**, Univ. Cluj, Roumanie)

4. Biocapteurs : 4.5.6. Pesticides

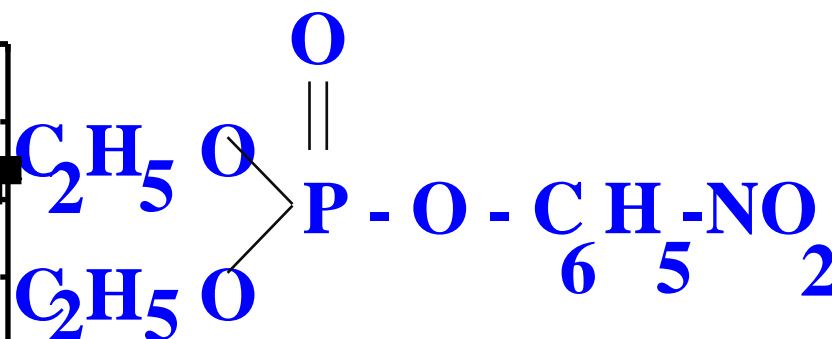
■ 4.5.6.4 Détection

- Type 1. **Mélange Pesticide + ASCh** :
 - ◆ Addition 0,2 ou 1 mM ASCh $\Rightarrow I_0$
 - ◆ Addition de pesticide $\Rightarrow \Delta I = I_0 - I$
 - ◆ $\Delta I / I_0$ vs $\log [\text{pesticide}] \Rightarrow$ **courbe calibration**
- Type 2. Incubation avec le **pesticide seul**
 - ◆ Courbe de calibration ASCh, i.e. I vs $[\text{ASCh}]$
 - ◆ Incubation 30 min avec pesticide (sans ASCh)
 - ◆ Courbe de calibration ASCh (sans pesticide) \Rightarrow **inhibition : diminution de la sensibilité**

4. Biocapteurs : 4.5.6. Pesticides



Paraoxon :



- **Type 1. Inhibition AChE par [pesticide] = 0.1-10 μM avec [ASCh] = 200 μM**
- **Moyenne de 4 capteurs**
- **10% inhib. => 0,4 μM**

4. Biocapteurs : 4.5.6. Pesticides

■ **Limite détection** insecticide organophosphoré (10% inhibition) [AChE]

- Trichlorfon (Dipterex) 5 - 55 μM 5-150 mU/mm^2
- Paraoxon 0,4 μM 480 mU/mm^2

■ **Régénération** (30 min, 1 mM 2-PAM)

- 85-90 % => **réversibilité** de l'inhibition insecticide

4. Biocapteurs : 4.5. Applications

- **4.5. Application** des biocapteurs électrochimiques :
 - 4.5.1. Mesure de substrats
 - 4.5.4 Mesure de métabolites
 - 4.5.5. Mesure de matière oxydable
 - 4.5.6. Mesure d'inhibiteurs enzymatiques
 - 4.5.7. **Biocapteurs à ADN**
 - ◆ Oxydation électrochimique de la guanine
 - ◆ Fonction de l'état d'hybridation de l'ADN
 - ◆ Permet la reconnaissance d'ADN



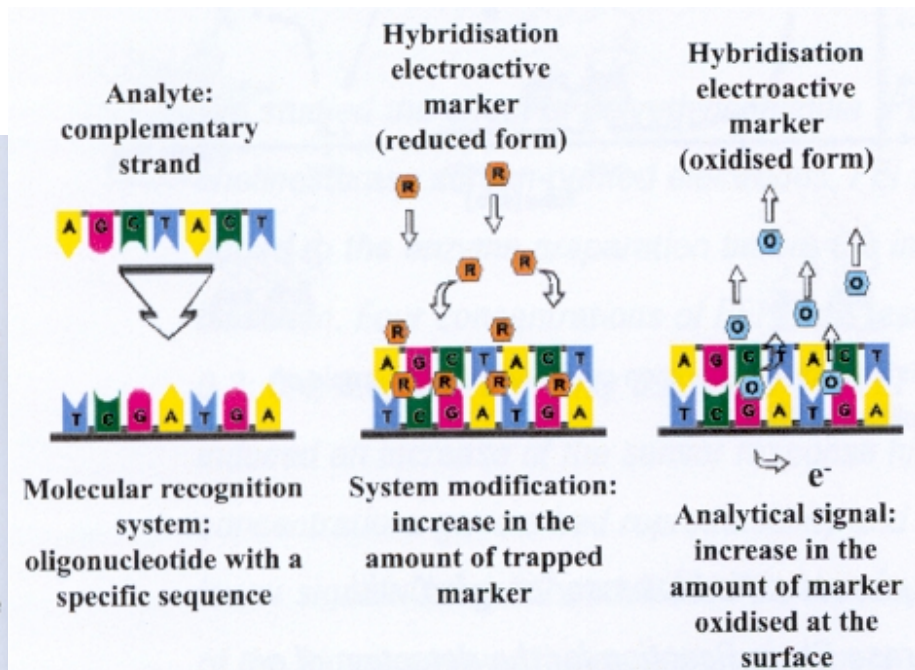
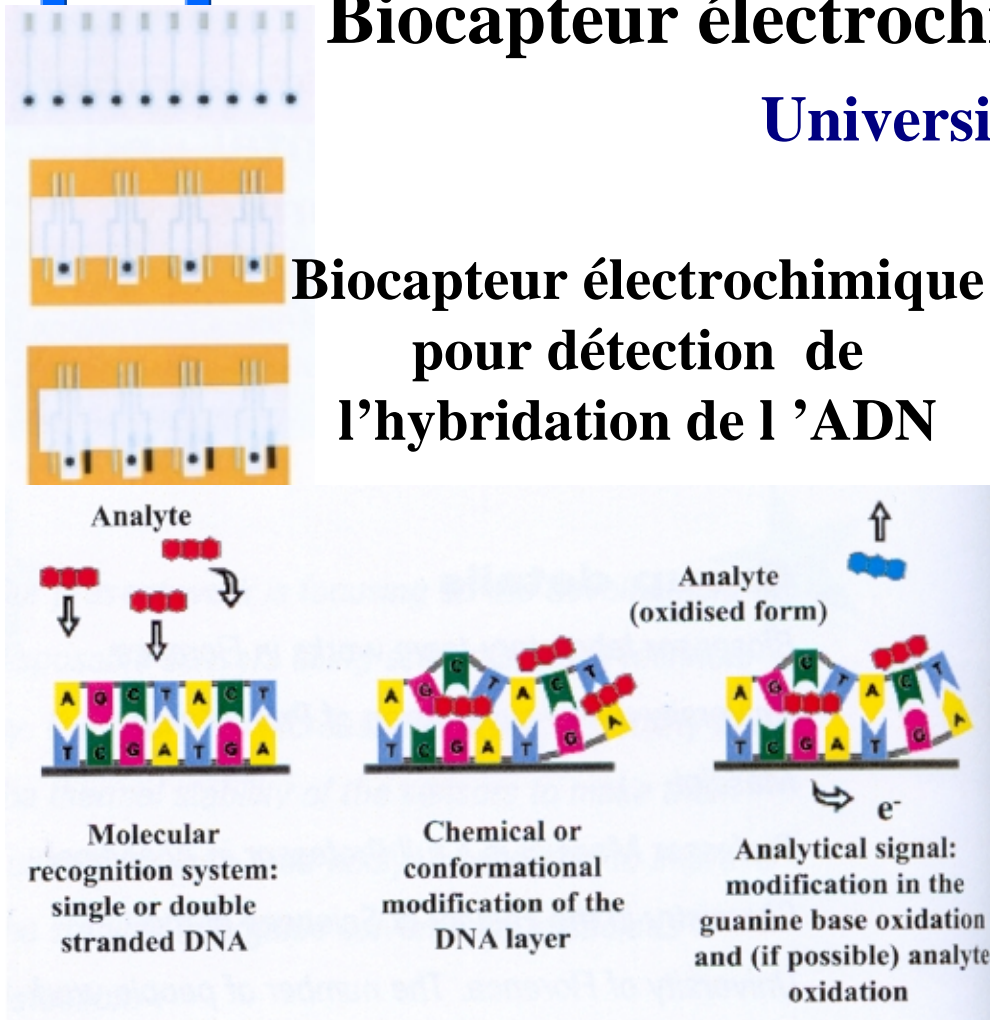
4. Biocapteurs : 4.5.7. ADN

Biocapteur électrochimique : 'hybridation' ADN

Université de Florence

Biocapteur électrochimique pour détection de l'hybridation de l'ADN

Biocapteur électrochimique pour molécules se liant à ADN



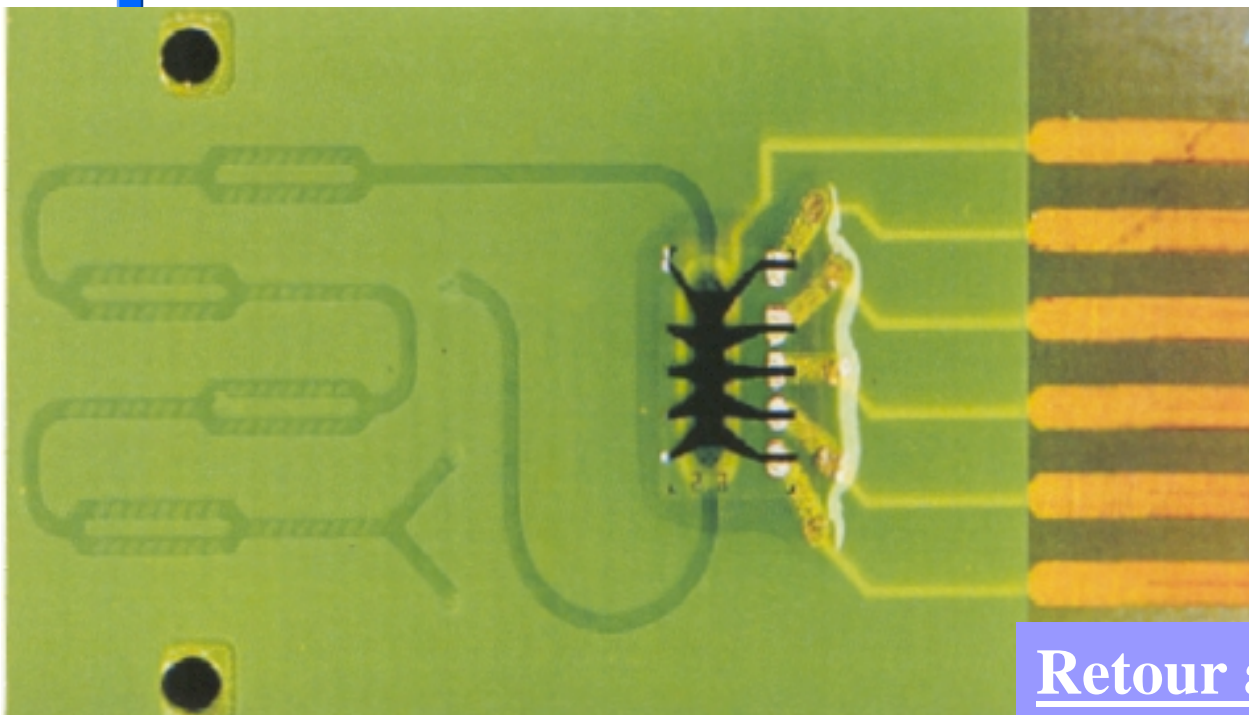
4. Biocapteurs : 4.5. Applications

- 4.5. **Application** des biocapteurs électro-chimiques
 - 4.5.1. Mesure de substrats
 - 4.5.4. Mesure de métabolites
 - 4.5.5. Mesure de matière oxydable
 - 4.5.6. Mesure d'inhibiteurs enzymatiques
 - 4.5.7. Biocapteurs à ADN
 - 4.5.8. Micro-capteurs et micro-cellules de mesure



4. Biocapteurs : 4.5.8. Miniature

Institute of Microsystem Technology (IMTEK),
Université de Freiburg, Allemagne



Micro système
bioanalytique avec
un réseau de
biocapteur et
**mélangeur de
réactifs**

[Retour au sommaire biocapteur](#)

4. Biocapteurs : 4.5. Applications

■ Que retenir ?

- **Très grand foisonnement de proposition de capteurs & instruments**
- **Exploitant le principe des biocapteurs électrochimiques**
- **Souvent de dissémination/valorisation limitée**
 - ◆ **Complexité du passage de la recherche à la réalisation industrielle**
 - ◆ **Moyens et objectifs très différents !**

4. Biocapteurs : 4.6. Conclusions

- **Potentialités** très importantes
 - diversité, sélectivité, sensibilité
- **Complexité** opérationnelle
 - multi-disciplinarité des compétences nécessaires
- Effets de **mode** et **perspectives** des progrès en
 - électrochimie, miniaturisation, optique, immunologie, ADN, production industrielle, traitement de signal
- Difficultés spécifiques aux mesures en **eaux naturelles ou usées**

[Retour au sommaire biocapteur](#)

[Sommaire](#)



5. Capteurs électrochim. : Conclusion

- 5.1. Synthèse des **performances**
 - 4 types de capteurs / électrodes spécifiques
- 5.2. **Étapes de développement** des capteurs et instruments associés :
 - Quel **fonctionnement** ?
 - ◆ mesure unique
 - ◆ surveillance continue
 - ◆ alerte...
 - Quels **utilisateurs** ?
 - Quel degré **d'automatisme** ?

5. Capteurs électrochim.: 5.1. Synthèse

Type capteur	Métal	Spécif. ionique	Spécif. à gaz	Biocapteur
Espèce	Réducteur, oxydant	Ions minéraux	Gaz oxydant ou ac-base	Métabolite, inhibiteur
Transducteur	Pt, Au, Hg, C	2 électrodes de référence	Electrode Pt, Au ou capt. pH	Electrode Pt, C ou capteur à pH, O ₂ ou CO ₂
Membrane	Sans	Verre, cristaux, organique	Hydrophobe, perméable aux gaz	Enzyme(s) ou Ab immobilisé(s)
Réponse : calibration	$I_p \propto C$ $\Delta E \propto \lg C$	$\Delta E \propto \lg C$	$I_{stat} \propto C$ $\Delta E \propto \lg C$	$I_{stat} \propto C$ $\Delta E \propto \lg C$
Réponse : type	Transitoire, stationnaire, équilibre	Equilibre	Stationnaire, équilibre	Stationnaire, transitoire



5. Capteurs électroch. : 5.3. Perspective

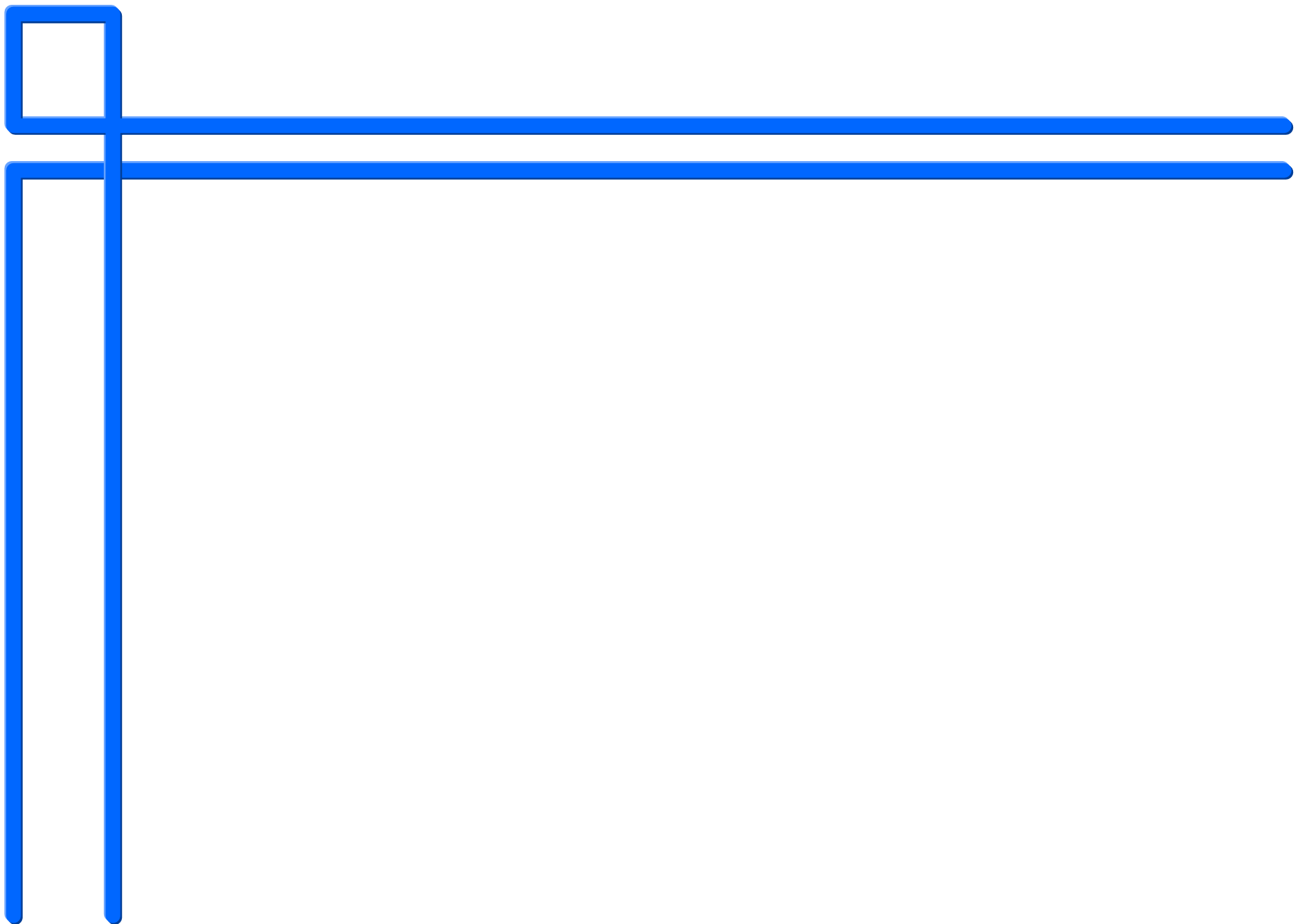
- **5.3. Perspectives** offertes par :
 - La **miniaturisation**,
 - La **production industrielle** des capteurs et instruments associés
 - Le **traitement de signal**
 - ◆ capteurs “ intelligents ”, redondants (ex: nez artificiel)
 - L'utilisation de **transducteurs non électrochimiques**
 - ◆ Optiques
 - ◆ Massiques
 - ◆ Enthalpiques...

5. Capteurs électroch. : 5.4. Perspective

- **5.4. Compétences** nécessaires au développement de capteurs et biocapteurs électrochimiques :
 - Analytique,
 - Physico-chimique,
 - Biochimique et micro biologique,
 - Electronique et traitement de signal
 - Mathématiques et modélisation
- **Fort développement en cours** : à vous de **jouer** !

[Retour au sommair](#)





4. Biocapteurs : 4.5.5. DBO

■ Biosensores SL, Moncofar, Espagne

- Suivi de la présence de **toxiques** :
inhibiteurs

