



UNIVERSITE DE TLEMCEM
Institut de Biologie

THESE

Pour Obtenir le diplôme de

MAGISTER

" ECOLOGIE ANIMALE "

" Hydrobiologie "

Par

Amina TALEB

**ETUDE EXPERIMENTALE DES EFFETS
DES MATIERES EN SUSPENSION SUR
QUELQUES ORGANISMES BENTHIQUES**

Soutenue le Novembre 1992 devant le jury

MM. N. LEUTREUCH
J. GAGNEUR
A. L. ROUX
A. THOMAS
D. DEBOUZIE

Président
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur

REMERCIEMENTS

Ce travail a été mené sous la direction de Monsieur **J. GAGNEUR**, Maître de Conférence à l'Université Paul Sabatier, je le remercie sincèrement de sa disponibilité et du souci de perfectionnement avec lequel il m'a initiée à l'hydrobiologie.

Je remercie également Monsieur **N. LEUTREUCH**, Maître de Conférence, à l'Université de Tlemcen, d'avoir accepté de présider ce jury.

Monsieur le Professeur **A.L. ROUX**, m'a accueillie dans son laboratoire de l'Université Claude Bernard et m'a donnée l'occasion de développer mes connaissances. Je lui exprime toute ma reconnaissance.

Je tiens également à remercier Monsieur **D. DEBOUZIE**, Professeur à l'Université Claude Bernard, pour son aide indispensable en statistique et en informatique.

Je remercie Monsieur **A. THOMAS**, Professeur à l'Université Paul Sabatier, qui a accepté de m'accorder une partie de son temps pour lire et apprécier cette thèse.

Monsieur **M. BOURNAUD** a toujours été disponible pour discuter de mon travail. Qu'il trouve ici l'expression de ma gratitude

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
1. MATERIELS ET METHODES	4
1.1. Espèces étudiées	4
1.1.1. Ecologie des espèces	4
1.1.2. Taille des larves	7
1.2. Stations de récolte et prélèvement de la faune	7
1.3. Obtention des fractions	8
1.4. Dispositif expérimental	9
1.4.1. Le canal expérimental	10
1.4.2. Appareil de mesure de la vitesse du courant	10
1.5. Principe de la méthode : expérimentation	13
2. ETUDES PRELIMINAIRES	15
2.1. La température	15
2.2. Temps d'exposition	15
2.3. Lumière	15
2.4. L'eau	16
2.5. Le substrat	16
2.6. Influence de la vitesse	18
3. TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNEES	20
3.1. Traitement global	20
3.1.1. Anova 2	20
3.1.2. Anova 1	21
3.2. Analyses complémentaires	21
3.2.1. Méthode de Contrast	22
3.2.2. Méthode de Dunett	22
3.2.3. Test de Student	22
3.3. Test du Kideu	23

4. RESULTATS	25
4.1. Choix du substrat	25
4.1.1. Interprétation	25
4.1.2. Conclusion	28
4.2. Influence de la vitesse du courant	28
4.2.1. Commentaire	28
4.2.2. Discussion	28
4.3. Influence des MES	31
4.3.1. Influence de l'argile	31
- Influence des concentrations	31
- Effet combiné de l'argile et du courant	34
- Conclusion	37
4.3.2. Influence des limons fins	37
- Influence des concentrations	37
- Effet combiné des limons fins et du courant	40
- Conclusion	40
4.3.3. Influence du limon grossier	40
- Influence des concentrations	40
- Effet combiné des limons grossiers et du courant ...	44
- Conclusion	46
4.3.4. Influence du sable fin	46
- Influence des concentrations	46
- Effet combiné du sable fin et du courant	49
- Conclusion	51
4.3.5. Influence du sable grossier	51
- Influence des concentrations	51
- Effet combiné du sable grossier et du courant	54
- Conclusion	54
4.3.6. Influence du mélange	54
- Influence des concentrations	54
- Conclusion	56

5. DISCUSSION	59
5.1. Les facteurs indépendants de l'espèce	59
5.1.1. Influence de la taille des particules	59
5.1.2. Influence des concentrations	62
5.1.3. Influence de la vitesse	64
5.2. Les facteurs propres à l'espèce	66
5.2.1. Influence de la taille des larves	66
5.2.2. Influence de la morphologie	66
5.2.3. Ecologie	68
CONCLUSION	70
BIBLIOGRAPHIE	73

Introduction

Les cours d'eau algériens et plus généralement nord-africains subissent d'importantes perturbations d'origines naturelles en raison de leur régime hydraulique, alternant un étiage prolongé et sévère à des crues violentes, brutales favorisant une érosion très forte des rives, accrue par la rareté de la végétation des parties basses des oueds. A ces perturbations naturelles s'ajoutent celles des activités humaines, entre autres les exploitations de gravières qui destabilisent les lits et remettent en suspension une grande quantité d'éléments fins. Ces derniers colmatent le fond, entraînant la raréfaction de la plupart des groupes faunistiques (Clavel et al, 1977; Cuinat, 1980). La faune interstitielle est également affectée (Bou, 1977; Gagneur et Chaoui-Boudghène, 1991).

En chiffrant les quantités de matériaux transportées sur l'ensemble de quelques bassins versant algériens, Mebarki (1984) et Yadi (1991) montrèrent qu'elles sont nettement supérieures à celles mesurées dans les rivières d'autres régions du globe. Exemple : 55g/l le 19-03-89 dans l'oued Tafna (Crue), 52g/l le 12-01-55 dans l'oued Isser affluent de la Tafna, 34g/l dans l'oued Rhumel (crue de 1979) (Mebarki, 1984) et 647g/l dans l'oued Leham (Algérie) pendant la crue du 06-10-57.

Pour comparaison, 40mg/l en moyenne dans la Garonne à Portet (100mg/l en période de crue), 57 à 67mg/l dans le Rhin à son embouchure et 100mg/l pour l'Amazone.

Les matières en suspension représentent donc un problème qui prend une importance croissante. En effet, leur quantité constamment élevée dans ces eaux, constitue un facteur pouvant expliquer la distribution particulière des invertébrés benthiques (Gagneur, sous presse). La plupart d'entre eux se concentrent dans la zone amont des rivières et la faune des zones aval est très appauvrie.

Dans la littérature, de nombreuses études ont révélé l'effet

des MES sur les poissons (Ritchie, 1972; Bruton, 1985), sur le périphyton (Hansman et Phinney, 1973), sur les macrophytes (Bouchaud et Clavel, 1978) et sur le benthos (Pearson et Franklin, 1968; Gammon, 1970; Ciborowski, 1976; White et Gammon, 1977; O'Hop et Wallace, 1983; Culp et al, 1986). Etudiant la dérive des invertébrés aquatiques due à l'introduction de sédiments en suspension, certains de ces auteurs ont montré que le taux de dérive est considérable lorsque la charge dépasse 100mg/l. D'autres, comme (Tebo, 1955; Herbert et al, 1961; Clavel et al, 1978; Gray et Ward, 1982), en étudiant la densité du benthos, ont noté une réduction de celle-ci de 70 à 90% lorsque la rivière reçoit entre 200mg/l et 6g/l de sédiment en suspension.

Les résultats de ces études indiquent que la dérive des invertébrés augmente avec la charge en sédiment. Ceci se traduit par des densité et diversité de ces communautés réduites.

L'explication est à rechercher dans l'existence des différents effets des MES. Parmi ceux-ci, "l'étouffement" du biotope est souvent avancé par les auteurs citons : (Ellis, 1931; Hamilton, 1961; Nuttall, 1972; Cuinat, 1980; Lenat et al, 1981; Culp et al, 1986). Il est évident que le colmatage des fonds par les fines particules, affecte non seulement la faune des interstices mais constitue avec le temps un substrat compact à la manière d'un ciment, empêchant les animaux non fouisseurs de pénétrer (Mc Clelland et Brusven, 1980).

La turbidité (résultant des MES), réduit la pénétration de la lumière et réduit considérablement la photosynthèse ainsi que la croissance des plantes et des algues (Wallen, 1951; Surber, 1953; Hynes, 1960). La réduction de la productivité primaire (Robards, 1972; 1984) à des conséquences néfastes sur la faune en général, sur le Zooplancton (Hart, 1988) et la faune benthique en particulier (Magnin, 1977).

Enfin, l'effet abrasif dû au transport des particules au niveau des organes fragiles des invertébrés (Van Oosten, 1942; Nuttall, 1972; Nuttall et Bielby, 1973; Rosenberg et Wiens, 1978b) et des macrophytes a été également signalé.

Ces études sont directement consacrées à l'impact des MES sur

les organismes aquatiques. Souvent, elles concernent une étude des communautés benthiques dans une rivière chargée en MES (Cordone et Kelley, 1961; Rosenberg et Wiens, 1975; Scullion et Edwards, 1980; Gray et Ward, 1982) ou les effets d'une introduction expérimentale de sédiment en suspension dans une rivière (Gammon, 1970; Bjornn et al, 1977; Rosenberg et Wiens, 1978a). Dans certains cas, elles concernent quelques rares expérimentations: au laboratoire (Luedtke et Brusven, 1976; Ciborowski et al, 1977; Mc Clelland et Brusven, 1980). Cependant, la résistance des organismes est mal connue. Badri et al (1978) ont montré que les animaux peuvent résister aux pointes de crue mais quels sont les effets des MES sur la composition des biocénoses; et sur la distribution spatiale des organismes ?

Plusieurs questions se posaient.

- Etait-ce la taille des particules qui était prépondérante ? ou la concentration des MES ?
- Ou encore la vitesse du courant transportant les MES ?
- L'effet des combinaisons de ces différents paramètres était-il identique sur différents organismes ?

Le but de notre travail est de répondre à toutes ces questions en recherchant expérimentalement la limite de tolérance de quelques espèces benthiques.

Il a fallu, pour cela, récolter divers organismes représentatifs du réseau hydrographique étudié (Tafna) et les soumettre à différentes conditions expérimentales, en faisant varier successivement :

- Le type de MES (Argile - Limon - Sable)
- La teneur en MES
- La vitesse du courant.

A chaque fois, on observera le comportement des organismes, les dommages physiques éventuellement subis par ces organismes, et on cherchera à déterminer les seuils de sensibilité à chacun des facteurs en mesurant le temps de résistance pour chacune des concentrations, vitesses et catégories d'organismes.

1. Matériels et méthodes

1.1. Espèces étudiées

Le comportement de 7 espèces d'insectes a été étudié au cours de ce travail. Il s'agit de *Caenis luctuosa* [Burmeister, 1839] (Ephéméroptère, Caenidae), *Baetis rhodani* Pictet, 1845 (Ephéméroptère, Baetidae), *Ecdyonurus rothschildi* Navas, 1929 (Ephéméroptère, Heptageniidae), *Calopteryx virgo meridionalis* [Linné, 1758] (Odonate, Calopterygidae), *Eoperla ochracea* [Kolbe, 1888] (Plécoptère, Perlidae), *Hydropsyche fezana* Navas, 1935 (Trichoptère, Hydropsychidae) et *Simulium ornatum* Meigen, 1918 (Diptère, Simuliidae).

Ces espèces sont parmi les plus représentatives des oueds du bassin de la Tafna. Leur abondance dans nos stations, nous a permis de les récolter aisément.

Par ailleurs, il nous a semblé intéressant de comparer le comportement des filtreurs (Simuliidae, Hydropsychidae) et celui des nons filtreurs vis-à-vis des MES.

1.1.1. Ecologie des espèces

Pour chaque espèce, sont données :

- le biotope préféré,
- la répartition géographique générale,
- la répartition en Afrique du Nord.

Caenis luctuosa

- Espèce d'eau lente inféodée au substrat à faciès sédimentaire (El Agbani, 1984) d'où son caractère fouisseur. Elle tolère une température et une conductivité très élevées,
- vaste répartition géographique : d'Afrique du Nord à la Scandinavie jusqu'au Caucase et l'Arabie Saoudite,
- cette espèce est particulièrement représentative des cours d'eau de moyenne et basse altitude en Tunisie (Boumaïza et

Thomas, 1986), en Algérie (Gagneur et Thomas, 1988) mais elle peut remonter jusqu'au dessus de 2000m au Maroc (El Agbani, 1984).

Baetis rhodani

- Espèce trouvée de préférence dans les eaux à écoulement faible et moyen, disparaît dans les stations où le courant est rapide (Dakki, 1986). Elle préfère les eaux pures et oligotrophes,
- large répartition de l'Europe à l'Afrique du Nord,
- au Maroc, elle colonise les biotopes de haute et moyenne altitude avec une densité élevée dans les cours supérieurs (El Agbani, 1984). Elle est caractéristique de l'hyporhitron (Dakki, 1979) et l'épipotamon (Giudicelli et al, 1980),
- en Algérie, elle est plus fréquente et plus abondante dans la zone supérieure des oueds.

Ecdyonurus rothschildi

- Caractéristique des eaux courantes et rapides, préfère des vitesses de courant assez élevées (El Agbani, 1984),
- espèce endémique nord-africaine, récoltée au Maroc (Dakki, 1979; El Agbani, 1984), en Tunisie (Boumaïza et Thomas, 1986) et en Algérie (Soldan et Gagneur, 1985; Gagneur et Thomas, 1988).

La localité typique est Biskra en Algérie à moins de 200m d'altitude. El Agbani (1984), la cite du Maroc entre 200 et 1350m avec une préférence pour le cours supérieur de Bou Regreg.

Calopteryx virgo meridionalis

- Espèce qui fréquente les eaux courantes claires à écoulement très faible. D'après Zahner (1959), la vitesse d'écoulement optimale chez cette espèce varie de 3 à 30cm/s,
- occupe une aire couvrant l'Afrique du Nord et les pays du bassin méditerranéen occidental (Aguesse, 1968).

Eoperla ochracea

- Espèce trouvée dans les eaux rapides. Elle est très eurypote (El Agbani, 1984) on la retrouve jusque dans les cours d'eau pré-sahariens.

Elle est résistante à la pollution organique (Gagneur et Aliane, 1991);

- préfère les faciès d'altitude moyenne (Dakki, 1986),

- espèce circumméditerranéenne, se localise en Afrique du Nord, en Europe méditerranéenne et en Asie mineure (Illies, 1978),

- elle est citée du Maroc (Aubert, 1956, 1961; Giudicelli et Dakki, 1984; Mohati, 1985), d'Algérie (Lestage, 1925; Gagneur et Aliane, 1991), de Tunisie (Berthelemy, 1973),

- au Maroc, Dakki (1979) la rattache à l'épipotamon et en Algérie cette espèce appartient aux zones supérieures de piedmont, elle est caractéristique de l'épirhitral (Gagneur et Aliane, 1991).

Hydropsyche fezana

- Espèce rhéophile, sa distribution est liée à la fois à la matière organique et à la vitesse d'écoulement (Dakki, 1986),
- espèce endémique nord africaine, préfère les cours supérieurs où elle est très abondante dans les sources froides et leurs émissaires,

- espèce citée du Maroc et d'Algérie sous le nom d'*H. instabilis* (Dakki, 1978).

Simulium ornatum

- Espèce très rhéophile, se localise actuellement au niveau des sources et leurs émissaires,

- espèce de plaine de la bordure septentrionale méditerranéenne,

- récoltée en Algérie entre 500 et 1000m d'altitude (Gagneur et Clergue-Gazeau, 1988).

Remarque

Nous avons considéré également l'espèce *Onychogomphus uncatulus* (Charpent, 1840) (Odonate, Gomphidae) uniquement dans l'étude du choix du substrat. Ses effectifs réduits dans nos stations ne nous ont pas permis de l'étudier dans les expériences avec

les MES.

Onychogomphus uncatatus

- Espèce qui fréquente les eaux courantes mais préfère les endroits calmes,
- se répartie de l'Europe du sud ouest à l'Afrique du Nord (Aguilar et al, 1985).

1.1.2. Taille des larves

La taille des larves sélectionnées pour ce travail correspond à celle des stades prénymphaux pour *Simulium* et *Hydropsyche*, nymphaux pour les autres espèces. A ces stades, les larves sont plus faciles à manipuler et risquent moins d'être blessées ou traumatisées lors des expériences.

1.2. Stations de récolte et prélèvement de la faune

Nous avons retenu 3 stations sur tout le bassin de la Tafna pour les prélèvements des larves, car elles abritent en grand nombre les espèces choisies.

Nous ne donnerons ici que quelques renseignements indispensables à notre étude sur le milieu d'origine de ces animaux: on trouvera plus de détails dans les travaux de Gagneur (en préparation).

- Station Co

Située sur l'oued Chouly en amont de Yebdar, à l'altitude de 850m, cette station abrite la plupart des espèces testées à savoir *Ecdyonurus rothschildi*, *Baetis rhodani*, *Calopteryx virgo* *Hydropsyche fezana* et *Simulium ornatum*. Elle est caractérisée par une eau très claire dont la température moyenne est de 16°C, par un fond de cailloux et de galet et par un courant assez fort.

- Station SS

Située en aval d'El-Ourit sur l'oued Sikkak à une altitude de 700m, cette station est le lieu de récolte d'*Eoperla ochracea*. Elle présente une eau peu minéralisée et fraîche. Toutefois l'apport de matière organique est très important en raison d'un environnement d'arbres à feuilles caduques.

- Station T7

Située sur la moyenne Tafna en aval de Remchi, à une altitude de 105m, cette station présente une forte minéralisation, un débit très faible à l'étiage et une eau turbide avec un fond noirâtre. C'est le lieu de récolte de *Caenis luctuosa*.

Les animaux sont capturés au filet surber (vide de maille : 300 μ m) et transportés immédiatement dans une glacière au laboratoire, où ils sont installés sur un substrat composé de cailloux et de galets, dans la même eau que celle choisie pour l'expérimentation. Un aérateur assure l'agitation de l'eau et l'oxygénation.

Notons que nous n'avons retenu que les animaux n'ayant pas subi de dommages au cours du voyage. Les animaux destinés à l'expérimentation ne sont pas élevés au laboratoire mais proviennent directement des stations de prélèvements. Ils ne sont testés que 12 heures après leur récolte : temps minimal suffisant pour une bonne acclimatation.

1.3. Obtention des fractions

Afin de pouvoir différencier éventuellement les effets sur la faune dûs aux tailles des particules, il fallait, d'abord procéder au fractionnement de sédiments bruts. Nous avons retenus 5 fractions, dont la taille des particules correspond à l'échelle établie par l'association Internationale de la science du sol (Demolon, 1966) :

- 2,0 - 0,2mm - Sables grossiers (SG)
- 0,2 - 0,05mm - Sables fins (SF)
- 0,05 - 0,02mm - Limons grossiers (LG)
- 0,02 - 0,002mm - Limons fins (LF)

- < 0,002mm - Argiles (A).

Pour voir, si la combinaison des fractions avait un effet plus marqué, nous avons considéré également un mélange des 5 fractions composé de 40% d'argile, 20% de limon fin, 10% de limon grossier et 30% de sable fin. Le % de sable grossier est négligeable.

La séparation des fractions est obtenue par la méthode de sédimentation qui est conforme au protocole exposé par Valla et al (1980).

Les sédiments destinés à l'expérimentation, subissent tout d'abord un lavage avec H_2O_2 afin d'éliminer la matière organique, puis une dispersion des particules qui consiste en : 100g de sédiments mélangés, à 100ml d'une solution de 35,7g/l d'Hexamétaphosphate de Na ($NaPO_6$) et de carbonate de Na ($NaCO_3$) auxquels on ajoute 100ml d'eau distillée, sont bouillies et agitées pendant 1 heure. Après refroidissement, on passe la solution sur des tamis de 0,05, 0,2 et 2mm pour récupérer les sables. Le filtrat est mis dans une éprouvette de sédimentation ajustée à 1000ml.

Le temps de chute de chaque fraction est déduit de la formule de stock :

$$T = \frac{q}{2} \frac{h\eta}{r^2g(S-S_1)}$$

h : hauteur de chute.

η : viscosité dynamique du liquide.

S : densité de la sphère = 2,65g/cm³.

S_1 : densité de l'eau.

Les fractions fines sont obtenues par sédimentation et dessiccations successives.

1.4. Dispositif expérimental

L'étude de l'influence des MES a été réalisé au laboratoire. En milieu naturel, ce genre d'étude se heurte à de nombreuses difficultés comme par exemple la standardisation des conditions expérimentales, ou l'observation précise de l'effet d'un facteur sur les organismes testés.

De nombreux dispositifs de simulation en laboratoire sont utilisés pour étudier le comportement des invertébrés vis-à-vis du courant (Bournaud, 1963), du substrat (Brusven, 1973; Hildbrant, 1974; Mc Cleland et Brusven, 1980; Mc Nicol et Scherer, 1985; Kholer, 1985) ou encore des matières minérales (Cummin et Lauff, 1969).

Pour notre expérimentation, nous avons mis au point un dispositif voisin de celui décrit par Troubart (1981).

1.4.1. Le canal expérimental

De conception simple, il est formé d'une gouttière en zinc (100cmx4,5cmx4cm) représentant le ruisseau artificiel (fig.1). Celle-ci est fixée par des pinces à des statifs, afin de garder la pente constante. Un courant d'eau en circuit fermé, est assuré par une pompe électrique. Cette eau provient de la station Co.

La vitesse du courant est contrôlée au moyen d'une vanne, placée sur la conduite d'aspiration. Le substrat recouvre le fond de la gouttière de manière à présenter une surface à la fois rugueuse et plane sur laquelle, circule un courant uniforme.

Enfin, un filet de dérive dont les mailles sont inférieures à 1mm, est placé en aval de la gouttière pour récupérer les animaux qui décrochent.

1.4.2. Appareil de mesure de la vitesse du courant (fig.2)

Nous avons dû mettre au point un dispositif inspiré de celui décrit par Vaillant (1955), car c'est le seul appareil qui

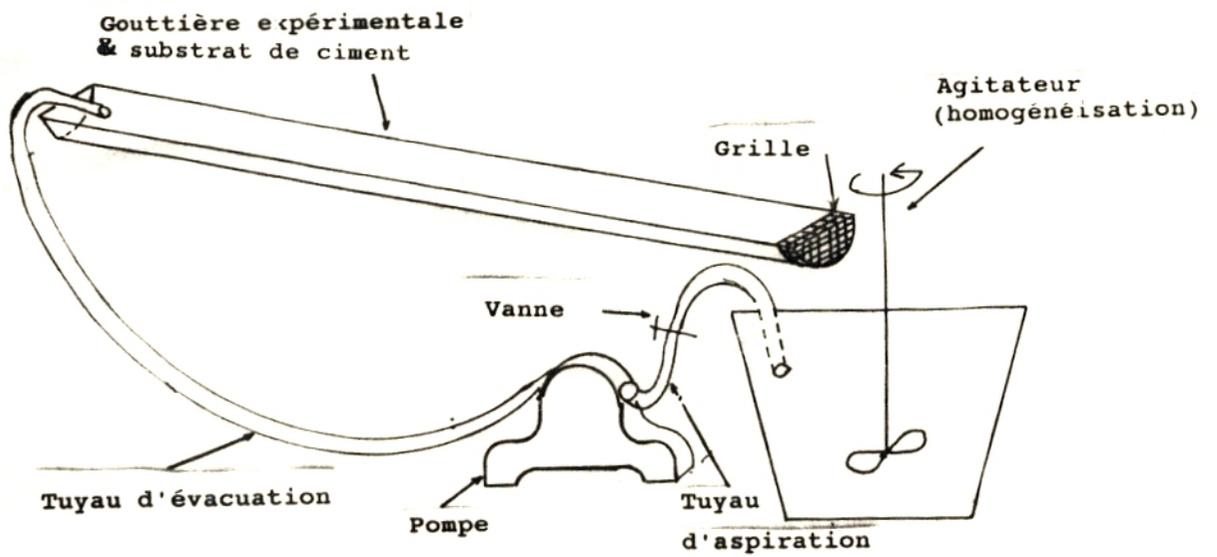


Fig.1 : Dispositif expérimental

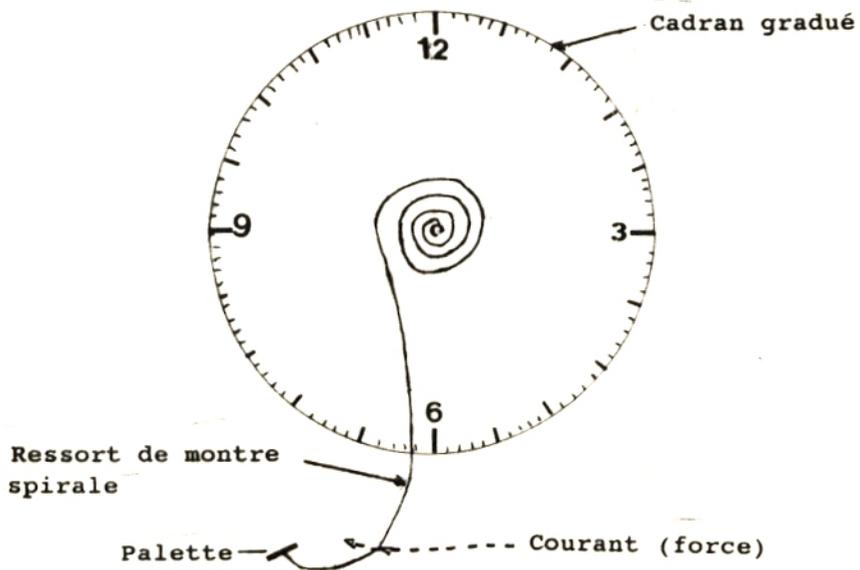


Fig.2 : Appareil de mesure de la vitesse du courant .

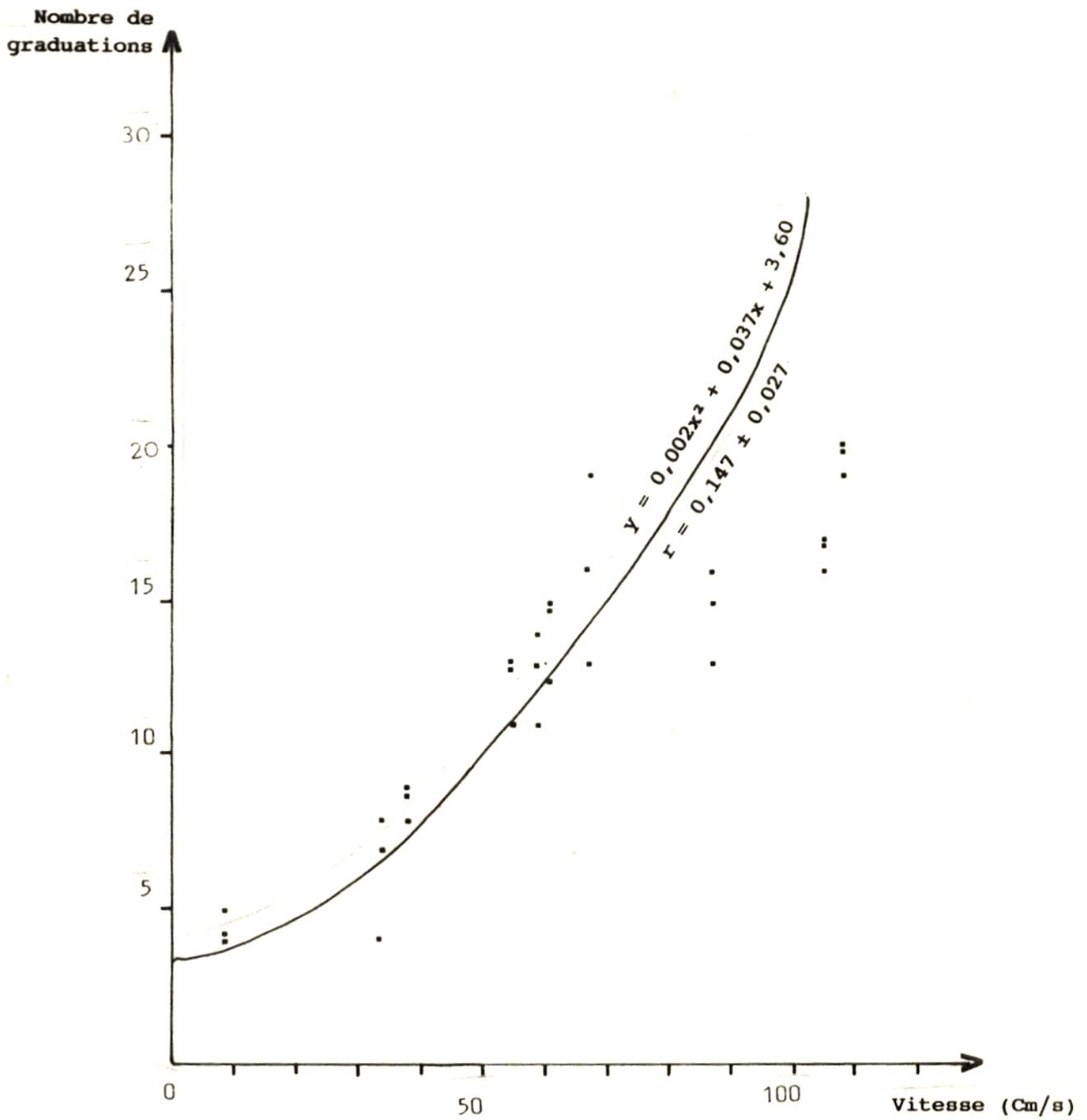


Fig.3 : Courbe d'étalonnage de l'appareil de mesure de la vit

convenait pour la mesure de la vitesse dans une épaisseur d'eau ne dépassant pas 1cm.

Il comprend : un ressort de montre spiral fixé en son centre sur un cadran gradué. L'autre extrémité libre et munie d'une palette, est plongée dans l'eau et destinée à amplifier la déformation du ressort due à la force exercée par le courant sur celui-ci. Cette extrémité sert d'index devant une échelle graduée qu'on a pu étalonner en fonction de la vitesse du courant. L'étalonnage a été réalisé au moyen d'un tube de Pitot, en choisissant sur le terrain un certain nombre de points correspondant à une gamme de vitesses. Chaque vitesse considérée est mesurée 3 fois.

Le graphe de la déformation du ressort spiral en fonction de la vitesse mesurée au tube de Pitot (fig.3) nous a donné un nuage de points dispersés, dont nous avons testé la non linéarité. Cette dernière est hautement significative $F_{nl} = 29,9$ pour un $F_{théorique} F_t = 2,34$. Par conséquent, la courbe d'étalonnage est une parabole d'équation théorique : $y = a_2x_1^2 + a_1x_1 + a_0$ que nous avons ajusté selon la théorie des moindres carrés (méthodes des maximum de vraisemblance) avec :

$$f(a_0, a_1, a_2) = \sum_{i=1} [y - (a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2)]^2$$

d'où l'équation de la courbe d'étalonnage :

$$y = 0,002x^2 + 0,037x + 3,60$$

Avec $r = 0,147 \pm 0,027$ pour 95% de degré de sécurité

1.5. Principe de la méthode (Expérimentation)

L'étude des effets des matières en suspension sur les larves d'insectes consiste à tester plusieurs concentrations de chacune des fractions obtenues, en fonction de la vitesse du courant. Cependant, cette étude nécessite avant tout une détermination des conditions dans lesquelles l'animal doit être placé : Oxygène, Température, Substrat, etc... .

Avant d'expérimenter sur les organismes, nous avons testé un certain nombre de facteurs, afin de déterminer les meilleures conditions expérimentales permettant l'observation de l'effet des MES et lui seul.

Principalement, c'est le décrochage des larves ainsi que les modifications du comportement qui ont été notés.

Les expériences ont d'abord porté sur des concentrations variant entre 20 et 500mg/l car ces concentrations ont été utilisées par Gammon (1970), Rosenberg et Wiens (1975) et White et Gammon (1977). Cependant, aucun effet n'a été observé sur les espèces étudiées. Cela nous a incité à reprendre les expériences avec des concentrations proches de celles mesurées pendant les hautes eaux et lors des crues dans les oueds algériens respectivement 20 et 400g/l.

Le nombre d'animaux utilisés pour une concentration donnée varie de 20 à 25 individus.

De plus, pour éviter un traumatisme dû aux brusques variations des concentrations, nous avons augmenté progressivement la concentration durant 5 à 10mn jusqu'à obtention de la concentration à tester. Les larves traumatisées et assommées sont considérées comme animaux éliminés. Elles ne sont donc pas réutilisées pendant les essais.

2. Etudes préliminaires

2.1. La Température

Les expériences se sont déroulées dans un local où la température ambiante varie de 18°C à 25°C. A défaut d'une chambre climatisée, réglée à 18°C et pour pallier cet inconvénient, nous avons pensé à un système de refroidissement très simple qui consistait à plonger complètement la cuve d'eau dans de la glace. Ceci, afin de maintenir la température à environ 18°C. Cette dernière correspondant davantage à celle de la station.

2.2. Temps d'exposition

Nous avons fixé le temps d'exposition des larves aux conditions expérimentales à 15mn par essai. Ce temps correspondra à une bonne résistance des individus testés. Il a été choisi pour des raisons techniques : à défaut de trouver une pompe puissante, capable d'aspirer une eau très chargée en MES, nous en avons utilisé une petite qui ne pouvait pas fonctionner plus de 15mn surtout aux concentrations maximales.

D'autre part, la multiplication des essais ne permettait pas de prolonger l'observation au delà de 15mn. La prolongation des essais au delà de cette limite aurait entraîné d'autres variations dues à la conservation des larves en élevage, à moins d'homogénéité dans les lots de larves étudiés, provenant de récoltes différentes, aux difficultés à maintenir constantes les conditions expérimentales (T°, lumière, O₂...). Ce temps d'expérimentation retenu est un bon compromis autorisant une observation de l'effet des MES à forte concentration sur les larves minimisant au maximum les effets connexes.

2.3. Lumière

Au laboratoire, l'expérimentation a lieu dans un local éclairé par la lumière du jour. Les expériences se sont toujours déroulées en milieu de matinée et en début d'après midi car le taux de dérive est minimal (Bournaud et Thibault, 1973).

En testant à ces deux moments de la journée une centaine d'individus appartenant aux différentes espèces choisies, nous n'avons noté aucun décrochage pendant 15mn. Par contre, un taux élevé de dérive de ces animaux est enregistré juste avant et après le coucher du soleil, notamment chez *Caenis luctuosa* et *Simulium ornatum* avec 80% de décrochage. Ces dernières, se sont laissées décrocher, soit en ne tenant plus sur le substrat, soit en se déplaçant dans le même sens que le courant.

En procédant ainsi, nous avons réduit au minimum le taux de dérive naturelle liée au cycle circadien.

2.4. L'eau

Pour toutes les espèces choisies, l'eau où sont acclimatés et testés les animaux est celle de la station Co. Cette eau est claire avec une turbidité de l'ordre 25NTU, ce qui est très faible pour les eaux nord africaines. Elle est caractérisée par une température assez stable, un pH toujours alcalin, une salinité faible, la conductivité est de 600 μ s/cm traduisant une eau peu minéralisée.

2.5. Le substrat

La plupart des invertébrés benthiques munis de griffes ou de crochets, ont besoin pour se fixer d'un substrat rugueux sur lequel ils s'agrippent, quand il y a un courant d'eau. Certains expérimentateurs se sont intéressés à la distribution de ces invertébrés en fonction du type de substrat. Corkum (1976) a noté qu'une proportion importante de *Paraleptophlebia molis* (Ephéméroptère) s'associait surtout au gravier et moins aux branches. Leur dérive augmente lorsqu'elles sont placées sur le deuxième substrat. D'autres comme Hubault (1927), Edwards et Irving (1943) et Ambühl (1959) ont étudié la respiration des animaux en fonction du substrat, ce qui traduit l'effort fourni par l'animal. Ambühl a constaté que la consommation d'O₂ d'*Ecdyonurus* diminue presque de moitié (résultat hautement significatif), lorsqu'on dépose les larves sur un fond de verre

lisse où elles sont incapables de s'accrocher. Une différence encore plus forte existe, chez les larves d'*Ephemera* entre mesure sur fond de verre et mesure sur fond de sable (Wautier et Pattée, 1955; Pattée, 1962).

Le substrat influence donc le niveau du métabolisme de l'animal ce qui, en conséquence, nous a amené à rechercher le type de substrat, permettant le meilleur accrochage dans un courant d'eau durant le test, afin d'écartier toute éventualité d'un décrochage dû au type de substrat et à la fatigue de l'animal.

- Déroulement de l'expérience

La façon de procéder consistait à étudier sur 4 substrats : ciment + gravier, ciment + sable, colle + sable et galet, le temps d'accrochage des larves en fonction de la vitesse du courant. Cette dernière correspondra à 3 types de courant : faible (10cm/s), moyen (40cm/s) et rapide (60 à 70cm/s).

Remarque

Dans la suite du travail, nous appelons "colle" le substrat formé de colle recouverte de sable et "gravier", le substrat formé de ciment recouvert de gravier.

Nous avons choisi de tester quelques espèces appartenant à deux types d'organismes les rhéophiles et les limnophiles, car dans l'étude sur l'effet des MES, nous avons considéré les deux types. Les premiers sont représentés par *Eoperla ochracea*, *Ecdyonurus rothschildi* et *Hydropsyche fezana*, les seconds par *Calopteryx virgo* et *Onychogomphus uncatus*.

L'expérience consiste pour chaque substrat, à placer les larves isolement dans la gouttière expérimentale dont le fond est garni par un type de substrat, puis à les exposer à chacune des vitesses choisies. Le passage de la vitesse d'adaptation à la vitesse du test se fait progressivement à raison de 2cm/s/mn. L'opération est répétée 8 fois et pour chaque opération la larve subit 3 essais. Entre chaque essai, elle est abandonnée sur la grille (filet) où un courant la recouvre pendant un

temps de repos de 5mn. Ce dernier est jugé suffisant après une série de test préliminaire dans laquelle nous n'avons pas mis en évidence de différence de comportement chez les larves ayant bénéficié d'un temps de repos de 10mn.

Le temps d'accrochage est noté au moment où l'animal décroche.

2.6. Influence de la vitesse (expérience témoin sans MES)

Nous avons étudié le comportement des animaux vis-à-vis du courant. Ce qui nous a permis de sélectionner un intervalle de vitesses, dans lequel, l'animal résiste au moins 30s. Ce temps de résistance correspondra à la vitesse maximale provoquant un décrochage instantané. Cependant nous n'avons retenu comme vitesse maximale pour les expériences avec MES, que celle qui correspond à un temps de résistance égal à 5mn en moyenne. Les autres vitesses considérées dans cette étude correspondent à celles, auxquelles, les organismes peuvent être exposés, dans les conditions naturelles.

Signalons que nous avons respecté fidèlement les mêmes conditions expérimentales que dans l'étude du substrat.

Cette étude sur les individus non soumis aux MES (Témoins) servira de comparaisons aux expériences sur les individus soumis aux MES.

Pour chaque vitesse, le nombre d'individus utilisés varie de 3 à 4 larves pour les espèces de grande taille et les moins abondantes : il s'agit d'*Eoperla ochracea* (4 ind), *Ecdyonurus rothschildi* (4 ind) et *Calopteryx virgo* (3 ind), à 5 larves pour les plus petites : *Caenis luctuosa*, *Baetis rhodani*, *Simulium ornatum* et *Hydropsyche fezana*.

- Déroulement de l'expérience

Les individus sont installés séparément dans le ruisseau artificiel où ils s'accrochent et y choisissent un emplacement d'immobilisation, correspondant à leur préférence quant à l'agitation de l'eau. Une adaptation au courant est nécessaire

afin d'éviter un choc des larves. Elle consiste à augmenter graduellement celui-ci à raison de 2cm/s/mn.

Pour des conditions données (1 vitesse), chaque individu subit 3 essais et n'est pas réutilisé. Entre chaque essai les larves sont abandonnées sur la grille pendant 5mn où un courant les recouvre.

Le temps de résistance est noté.

Remarque

Le déroulement des expériences des MES s'est effectué de la même manière que l'expérience témoin.

3. Traitement statistique des données

Les méthodes ont été analysées graphiquement, afin de déterminer l'action du facteur MES sur la faune benthique mais une analyse de variance à 2 critères fut appliquée pour, permettre d'affirmer l'existence de différences significatives avec un degré de probabilité inférieur à 5%.

Les calculs sont faits sur des transformations angulaires ou $\text{Arc sin}\sqrt{P}$ où P est le % du temps d'accrochage.

Il s'agit pour nous, d'évaluer l'influence que peut avoir, une charge de sédiment fin sur chacune des espèces étudiées et son interaction avec la vitesse du courant.

3.1. Traitement global

3.1.1. ANOVA 2 (modèle croisé)

L'analyse de variance à 2 critères consiste à comparer la variation entre échantillons due aux facteurs contrôlés, en l'occurrence, le facteur concentration en MES d'une part et le facteur vitesse d'autre part, avec la variation due aux facteurs incontrôlés ou variation individuelle.

Le terme d'interaction peut être calculé afin de voir si l'action d'un des facteurs contrôlés est indépendante de l'action de l'autre.

La variable F de Snédécour représentera le test de nullité des facteurs contrôlés qui se fait, en comparant les carrés moyens des facteurs et les carrés moyens résiduels.

Ce test indiquera s'il existe des différences significatives d'une part, entre les vitesses considérées et d'autre part, ce qui nous importe le plus ici, entre les concentrations en MES. Dans le cas d'une interaction significative, les différences observées entre les concentrations dépendent de la vitesse utilisée mais, si l'interaction est nulle cela signifie que

l'effet des concentrations est indépendant de l'action de la vitesse.

Dans le cas présent, il s'agit de voir, les différences entre les réactions des individus dues aux MES et les réactions dues aux variations individuelles.

3.1.2. ANOVA 1

Nous avons utilisé l'analyse de la variance à 1 critère pour tester l'influence de la vitesse du courant sur les espèces étudiées dans l'expérience témoin.

L'ANOVA 1 consiste à comparer les moyennes de plusieurs populations supposées normales de la même variance, à partir d'échantillons aléatoires simples et indépendants les uns des autres (Dagnelie, 1970).

Les moyennes calculées ont permis de définir deux types de variation : variation entre échantillon ou variation due au facteur contrôlé (vitesse) et la variation dans les échantillons ou variation résiduelle.

La variable F de Snedecor désignera le test de nullité du facteur contrôlé.

L'hypothèse nulle est acceptée si $F_{\text{observé}} < F_{\text{théorique}}$.

Remarque

Dans ces analyses, nous avons considéré chaque essai séparément car ils sont dépendants les uns des autres.

F représentera le facteur MES ou facteur vitesse et F_i représentera l'interaction des 2 facteurs.

3.2. Analyse complémentaire

Si le test global (ANOVA) s'avère significatif, on se pose généralement la question de savoir, quelles sont parmi toutes les concentrations considérées, celles qui provoquent un effet significatif. Cette question est résolue par les méthodes de

comparaison multiples notamment, la méthode de contraste et les méthodes de Dunett ou de Student.

3.2.1. Méthode de contraste

Grâce à ses propriétés additives, la méthode de contraste nous permet de décomposer la somme des carrés d'une comparaison globale (variation due au facteur contrôlé) en comparaison dites orthogonales, possédant le même degré de liberté correspondant aux contrastes orthogonaux.

Le premier contraste nous apprendra, si l'effet obtenu dépend de l'absence ou de la présence des MES quelle que soit la concentration considérée.

Le deuxième contraste nous apprendra, si l'effet diffère d'une concentration à une autre : c'est à dire, l'influence des concentrations croissantes.

Remarque

Nous n'avons considéré que le deuxième contraste dans l'interprétation de nos résultats.

Une décomposition analogue est effectuée en ce qui concerne le facteur vitesse en considérant par exemple les mêmes contrastes que le facteur 1.

F_{co} est le test de nullité du contraste. S'il est nul, on rejettera l'hypothèse.

3.2.2. Méthode de Dunett

Cette méthode est surtout utilisée lorsque l'analyse de variance met en évidence l'existence de différences hautement significatives pour le test avec MES. Dans ce cas, on peut se poser la question de savoir : quelles sont les concentrations qui diffèrent significativement de la concentration témoin ? Ce qui revient à déterminer la concentration minimale significative. De plus, on peut déduire quelle est la fraction qui présentera le plus grand effet.

3.2.3. Test de student

Ce test n'est valable que pour l'analyse de la variance à 1 critère. Il a été utilisé dans le but de rechercher la vitesse minimale significative provoquant le décrochage des larves testées.

Le test de Student sert d'une manière générale à comparer les moyennes 2 à 2. Dans notre cas, il permet de comparer le temps moyen noté aux différentes vitesses testées, avec celui du témoin.

3.3. Test du Kideu (χ^2)

Pour savoir si le nombre de morts obtenu aux différentes concentrations est significatif par rapport au nombre total utilisé, nous avons calculé un χ^2_r à partir du tableau de contingence à L lignes et C colonnes.

L lignes représente : le nombre de morts et le nombre de survivants.

C colonnes représente : les concentrations utilisées.

Le χ^2_r calculé est comparé au χ^2_r théorique au seuil de 5%.

Par ailleurs, nous nous sommes proposés d'établir puis d'aborder l'examen détaillé de chacun des graphes des espèces étudiées. Ils représentent pour chacune, la réaction des organismes

- aux différentes concentrations utilisées
- à la gamme des vitesses choisies en présence d'une fraction donnée.

La courbe des concentrations exprimera le temps de résistance par concentration pour chaque fraction. Elle est établie à partir d'une échelle logarithmique pour une même vitesse (64cm/s).

Cette dernière est celle à laquelle tous les animaux résistent bien.

La courbe des vitesses traduira, l'influence de sédiments en présence du courant et permettra la comparaison plus rigoureuse des différentes vitesses entre elles (effet combiné).

Remarque

Nous n'avons considéré que le premier et le troisième essai dans l'interprétation des résultats vu leur importance dans l'évolution de la sensibilité des organismes.

4. Résultats

4.1. Choix du substrat

4.1.1. Interprétation

Pour chaque taxon, les résultats sont exprimés par le temps de décrochage en fonction de la vitesse du courant (fig.4).

Les résultats montrent que le ciment est le substrat le plus favorable pour l'ensemble des espèces étudiées. Pour cela, nous l'avons comparé statistiquement (ANOVA 2 et méthode de Dunnett) aux autres substrats afin de souligner les différences significatives.

Pour toutes les espèces étudiées ici, l'analyse de variance met en évidence une interaction hautement significative entre les vitesses et les substrats testés. Autrement dit, plus la vitesse augmente, plus la nature du substrat intervient dans le décrochage des larves.

La nature du substrat combinée au courant a le plus d'effet sur *Onychogomphos uncatus* ($F_1=40,62$; $F_{0,95}=2,4$) (fig.4d). Le décrochage diminue à mesure qu'on augmente le degré de rugosité du substrat. Selon la méthode de Dunnett, ciment et gravier se comportent de façon identiques et diffèrent significativement des substrats formés par les galets et la colle. Ces derniers ont un effet plus rapide et très significatif sur le décrochage des larves de cette espèce : dès les basses vitesses (12cm/s) l'accrochage des larves est de courte durée (15mn).

Pour *Calopteryx virgo* (fig.4c), gravier et galet diffèrent significativement du ciment et de la colle qui ont un effet identique. L'interaction entre les 2 facteurs testés est moins importante ($F_1=7,22$; $F_{0,95}=2,91$).

Pour *Ecdyonurus rothschildi* (fig.4a) et *Eoperla ochracea*, (fig.4e) les trois substrats galets, graviers et colle diffèrent significativement du ciment ($F_1=6,6$; $F_{0,95}=2,5$). Cependant, pour *Ecdyonurus*, le galet représente un substrat significativement plus défavorable que le ciment mais meilleur que les deux

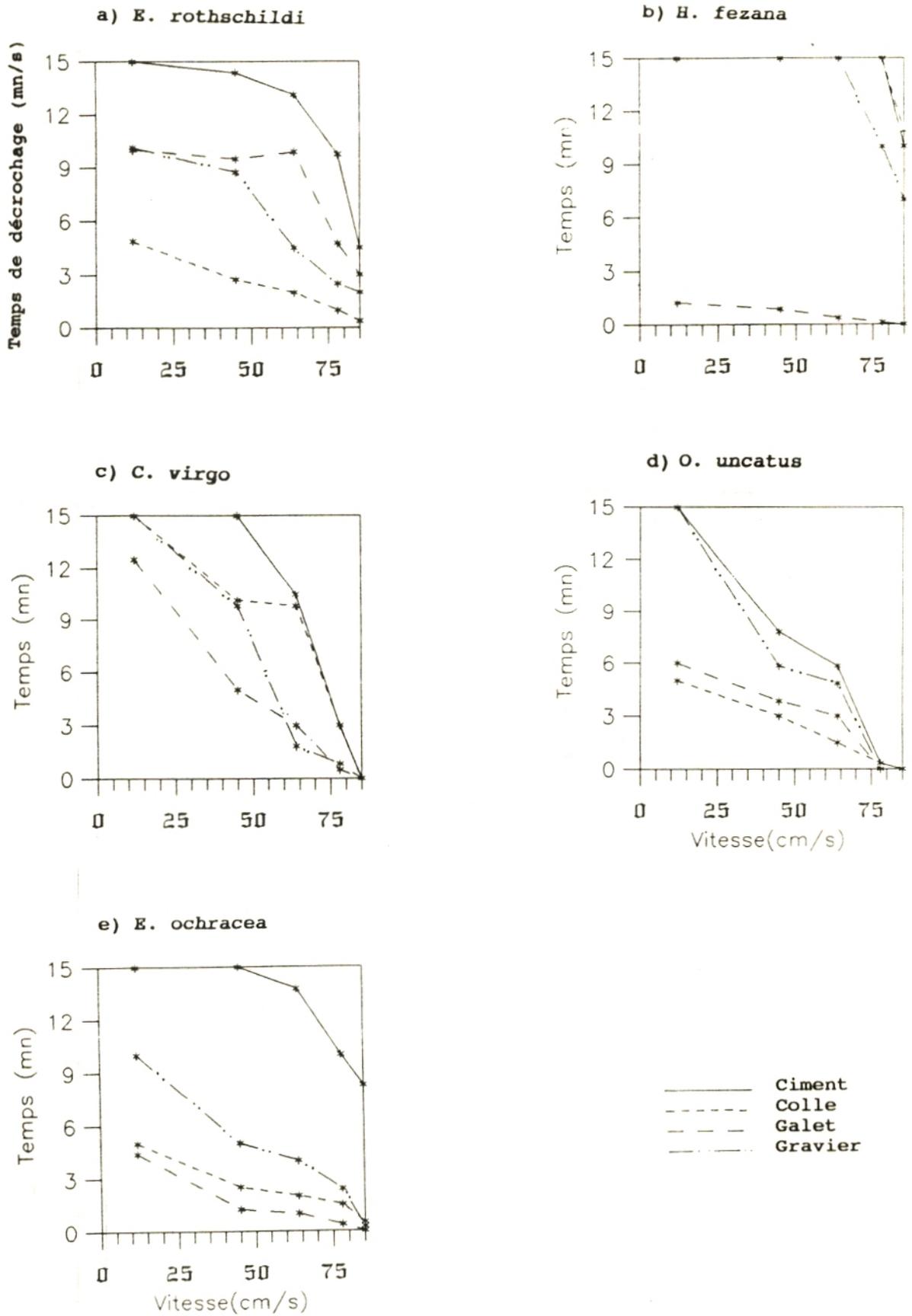


Fig.4. Influence du substrat en fonction de la vitesse du cour

substrats restants (graviers et colle). Pour *Eoperla*, le galet est le plus mauvais substrat après le ciment.

Hydropsyche fezana ne décroche de façon significative que sur le galet puisque ciment, gravier et colle selon la méthode de Dunette offrent les mêmes possibilités d'accrochage aux larves de cette espèce.

On peut donc classer les substrats du moins au plus favorable quant aux possibilités d'accrochage pour les espèces en faisant la somme des rangs pour chacun des substrats : la somme la plus faible correspondant au meilleur substrat.

Le galet provoque un net décrochage pour l'ensemble des groupes étudiés sauf pour *Ecdyonurus rothschildi* à des vitesses faibles et moyennes : ceci peut s'expliquer par le type d'accrochage : la larve d'*E.rothschildi* se plaque sur le galet et l'adhérence est meilleure sur une surface lisse.

Le gravier, bien qu'il soit le plus rugueux et le plus naturel, est peu favorable à certains groupes, comme *Ecdyonurus* et *Eoperla* notamment, qui décrochaient en laissant leurs pattes prises entre les interstices du gravier (leurs griffes s'y coincent). En effet, Walton et al (1977) ont noté un taux de dérive élevé d'animaux placés sur un substrat de gravier seul en augmentant la vitesse. Ces animaux, en essayant de rechercher refuge entre les interstices qui sont petites pour eux, décrochent. De plus, les microtubulences provoquées par la surface rugueuse sont défavorables à l'adhésion des larves.

Colle : *Hydropsyche* et *Calopteryx* peuvent facilement s'y accrocher, les autres groupes ont tendance à glisser.

Ciment : l'ensemble des espèces testées s'accrochent le mieux sur ce substrat même aux vitesses élevées. En effet, son excellente rugosité tout en ayant une surface homogène favorisant un courant uniforme (vitesse constante en tout point du substrat) permet une bonne et durable fixation des larves.

4.1.2. Conclusion

Parmi les quatre types de substrats étudiés, le ciment s'avère être le substrat le plus adéquat à tout point de vue, par opposition au galet qui est le plus défavorable pour notre expérimentation. Brusven et Prather (1974) ont montré qu'un Plécoptère (*Ptéronarcys*) et un Trichoptère (*Arctopsyche*) préfèrent les gros galets et que les Epheméroptères (*Ephemerella*) et les Trichoptères (*Brachycentrus*) préféreraient les galets quel que soit leur taille.

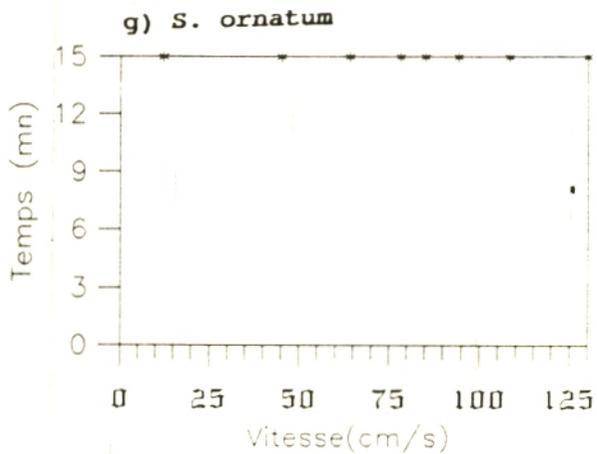
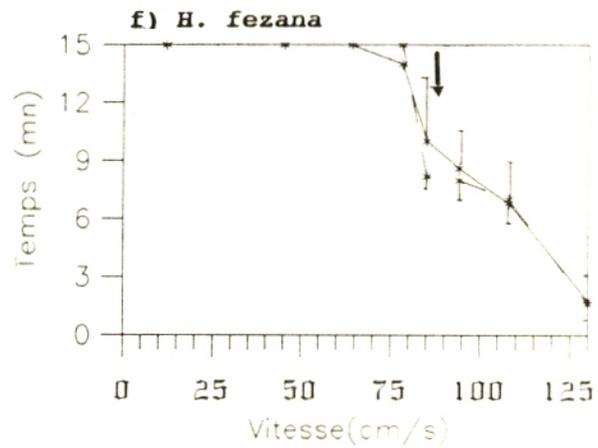
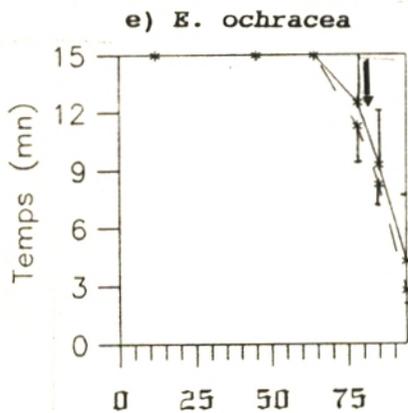
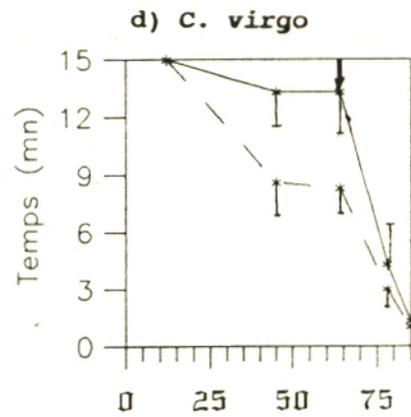
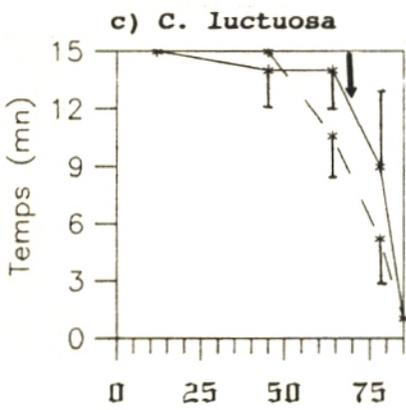
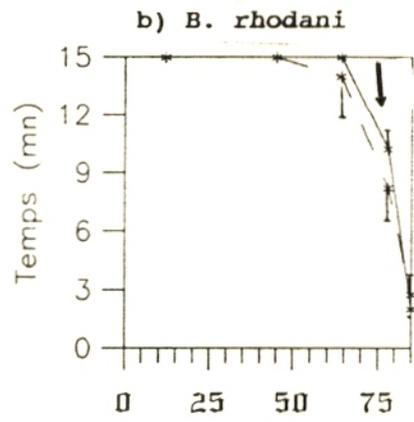
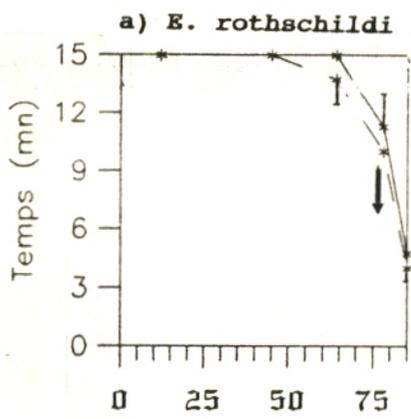
4.2. Influence de la vitesse du courant

4.2.1. Commentaire

La figure 5 montre des courbes temps de décrochage/vitesses de forme générale semblable pour la majorité des espèces. Des différences significatives apparaissent toutefois entre les espèces : elles se traduisent surtout par un F de Snédécour hautement significatif chez *Caenis luctuosa* ($F=14,34$; $F_{0,95}=3,5$) (fig.5c) et *Calopteryx virgo* ($F=17,25$; $F_{0,95}=3,5$) (fig.5d). Ces espèces décrochent respectivement d'une façon significative à 68cm/s et 64cm/s et ne résistent plus à 85cm/s alors que *Baetis rhodani* (fig.5b) et *Ecdyonurus rothschildi* (fig.5a) ont de plus en plus de difficulté à se maintenir à cette vitesse. Elles sont emportées d'une façon significative respectivement à partir de 72cm/s ($F=11,9$; $F_{0,95}=3,5$) et 74cm/s ($F=9$; $F_{0,95}=3,5$).

Eoperla ochracea (fig.5e) *Hydropsyche fezana* (fig.5f) et *Simulium ornatum* (fig.5g) sont très résistants à la variation du courant. Son action selon l'ANOVA 1 est non significative. En effet, la plus petite vitesse significative d'arrachement pour la première espèce est de 78cm/s et pour la seconde, elle est de 85cm/s. Quant à *Simulium* jusqu'à 130cm/s, l'action du courant est nulle. Cette dernière est traduite sur le graphe par une courbe horizontale (plateau).

4.2.2. Discussion



— 1^{ère} mesure
 - - - 3^{ème} mesure
 ↓ Vitesse minimale significative

Fig. 5. Influence de la vitesse sur le temps de réponse.

Excepté *Simulium*, quel que soit le degré de rhéophilie des espèces testées, la résistance au courant devient négligeable au-dessus de 130cm/s. Les vitesses maximales supportées diminuent en fonction du mode de vie de l'espèce : d'où l'existence de trois groupes d'espèces.

Les espèces les plus sensibles au courant sont *C.luctuosa* et *C.virgo*. Cette dernière peut se mouvoir dans l'eau à des vitesses atteignant 30 à 45cm/s et sa vitesse optimale est 30cm/s. Ces résultats confirment ceux de Zahner (1959) qui avait toutefois relevé des vitesses de locomotion plus importantes (entre 50 et 60cm/s). Cependant, beaucoup d'individus limnophiles de ces deux espèces lâchent prise immédiatement vers 85cm/s, vitesse où les rhéobiontes résistent bien. Il s'agit de *Simulium ornatum*, *Hydropsyche fezana* et *Eoperla ochracea*. Cette résistance observée, notamment pour *Hydropsyche*, concorde avec les résultats d'Edington (1968) et Faessel (1985).

Remarque

Pour tisser ses fils de soie, qui facilite son accrochage, *Hydropsyche fezana* nécessite un intervalle de vitesse compris entre [12-64cm/s]. Contrairement, Philipson (1954) avait démontré dans les conditions expérimentales que les larves d'*Hydropsyche instabilis* soumises à une vitesse de 30cm/s ne tissaient plus leurs filets.

En ce qui concerne *Ecdyonurus rothschildi* et *Baetis rhodani*, elles forment un groupe intermédiaire correspondant aux espèces réophiles qui se contentent des vitesses moyennes. D'après Dorier et Vaillant (1954) *B.rhodani* résiste jusqu'à 177cm/s pendant 1mn. Dans notre cas, elle ne peut résister au delà de 85cm/s. *Ecdyonurus* supportent jusqu'à 93cm/s.

Cette étude apporte donc des informations concernant la résistance au courant. Elle permet d'éliminer les vitesses maximales pour lesquelles l'animal décroche rapidement lors de nos expériences avec les MES afin de minimiser l'influence de la vitesse seule sur le décrochement.

4.3. Influence des MES

Nous avons estimé l'impact des MES sur les espèces choisies par la détermination du seuil de tolérance pour chaque espèce ainsi que sa résistance limite (concentration maximale). Deux facteurs entrent en jeu : les concentrations des fractions choisies et le courant. L'étude du facteur concentration se fait en comparant des concentrations testées avec le témoin afin de déterminer la concentration minimale significative.

Les comparaisons orthogonales (méthode de contraste) nous ont permis de voir s'il existe une différence significative entre les points des différentes courbes établies, donc entre les concentrations testées.

La répétition des essais pour un même individu, nous a permis également de voir l'influence du temps d'exposition aux MES. L'interaction entre les deux facteurs indiquera si le temps modifie l'influence des MES. C'est-à-dire, si les espèces soumises à ces concentrations montrent une sensibilité différente pendant le premier essai par rapport au troisième essai ou non.

L'étude du facteur courant se fait en considérant l'interaction entre les vitesses et les concentrations. La méthode des contrastes indique à partir de quelle vitesse l'influence des MES est plus accentuée.

4.3.1. Influence de l'argile

- Influence des concentrations (fig.6)

Ecdyonurus rothschildi (fig.6a) : cette espèce ne réagit significativement qu'aux fortes concentrations : 300g/l ($F=10,52$; $F_{0,95}=2,8$). A partir de ce seuil, les larves décrochent rapidement et à 400g/l aucune ne résiste. Selon la méthode de contraste, plus on augmente la concentration et plus l'effet est important ($F_{co}=10,52$; $F_{0,95}=4,04$) mais on n'observe pas de différence significative de comportement entre le premier et

troisième essai : ce qui indiquerait que le temps d'exposition n'influe pas. Cependant, les larves testées aux fortes concentrations, à partir de 200g/l, meurent dans le jour qui suit l'expérience contrairement à celles du témoin. Les concentrations élevées causent des traumatismes qui provoquent la mort des animaux.

Baetis rhodani (fig.6b), ne réagit significativement qu'à partir de 400g/l ($F=87,37$; $F_{0,95}=2,82$) mais ne supporte pas des concentrations beaucoup plus élevées. Cette espèce résiste bien quel que soit le temps d'exposition (pas de différence entre le premier et troisième essai ($F_1=1,5$; $F_{0,95}=2,6$) sauf à 400g/l où le temps influe significativement ($F=10,4$; $F_{0,95}=4,08$). Nuttall et Bielby (1973) indiquent même que les populations de *B. rhodani* sont plus importantes dans les stations polluées par des concentrations importantes en Kaolinite.

Caenis luctuosa (fig.6c) : cette espèce réagit significativement et très rapidement aux faibles concentrations d'argile : 30g/l ($F=12,69$; $F_{0,95}=2,84$). Le temps d'exposition n'influe pas significativement sur le décrochage quelle que soit la concentration utilisée, ($F_1=0,3$; $F_{0,95}=2,6$) mais sur l'état des larves testées; puisqu'à la fin de l'expérience, 25% sont inertes. Elles ne peuvent retrouver leur mobilité que si on les place dans une eau claire.

Calopteryx virgo (fig.6d) : présente une dérive significative à partir de 250g/l, ($F=11$; $F_{0,95}=3,01$) mais il faut 450g/l pour provoquer le décrochage immédiat. Cependant, selon la méthode de contraste, l'effet est significativement différent d'une concentration à une autre ($F_{co}=13,8$; $F'_{0,95}=4,96$) et au troisième essai la résistance est moindre : les animaux réagissent significativement à 100g/l. A partir de cette concentration, on note une différence de comportement significative entre le premier et le troisième essai ($F=11,28$; $F_{0,95}=4,26$).

Eoperla ochracea (fig.6e) : les larves de cette espèce ne sont sensibles significativement qu'à partir de 300g/l ($F=17,8$; $F_{0,95}=2,53$). Cette sensibilité varie d'une concentration à une

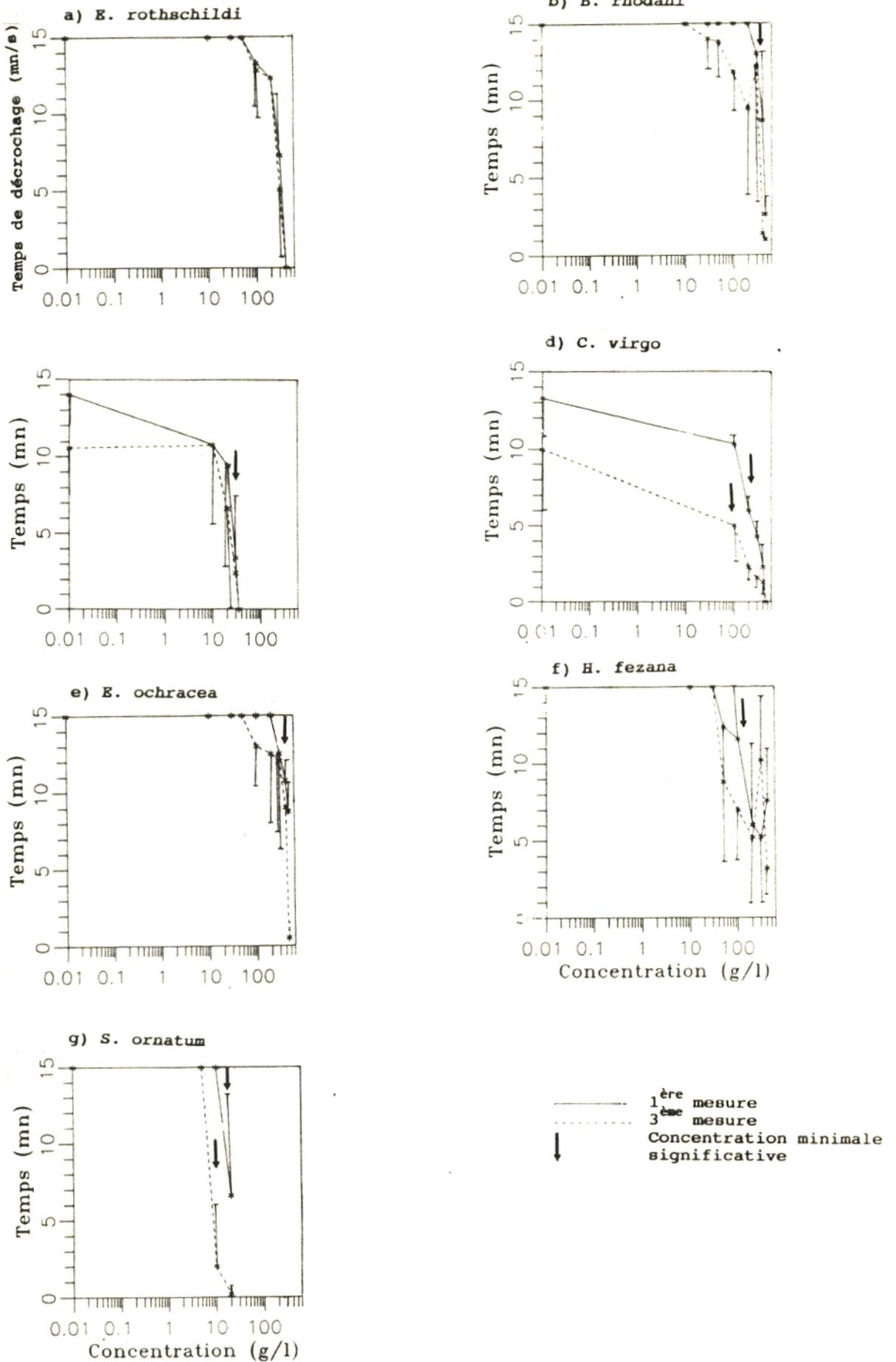


Fig.6. Influence de l'argile ([C])

autre ($F_{co}=13,9$; $F_{0,95}=4,08$), et elle est maximale à 450g/l au troisième essai : concentration à laquelle le temps d'exposition influe ($F=7,2$; $F_{0,95}=4,08$).

Hydropsyche fezana (fig.6f) : réagit significativement à partir de 100g/l ($F=20,3$; $F_{0,95}=2,5$). Pour des teneurs supérieures à 300g/l, la variation individuelle pour une même concentration l'emporte sur l'effet du facteur MES. La durée d'exposition ne modifie pas le comportement des larves quel que soit la concentration utilisée ($F_I=1,80$; $F_{0,95}=2,4$).

Simulium ornatum (fig.6g) : les larves décrochent significativement dès 15g/l ($F=19,8$; $F_{0,95}=2,7$). A partir de ce seuil, la sensibilité augmente significativement avec les concentrations ($F_{co}=8,08$; $F_{0,95}=4$) et atteint son maximum à des teneurs supérieures à 20g/l. De plus, on note une baisse hautement significative de la résistance ($F_I=10,1$; $F_{0,95}=2,9$) lorsque la durée d'exposition augmente. En effet, au troisième essai la concentration minimale significative est de 7g/l.

- Effet combiné de l'argile et du courant (fig.7)

Dans l'ensemble, l'ANOVA indique qu'il n'existe aucune interaction significative entre la vitesse du courant et les concentrations en argile pour l'ensemble des espèces testées. Donc, les différences de comportement des larves sont dues au facteur vitesse seul.

Cependant, la méthode de contraste montre que chez *Calopteryx virgo*, l'effet de l'argile est accentué significativement aux vitesses élevées ($F_{co}=15,6$; $F_{0,95}=4,3$). On note aussi une légère interaction ($F_I=2,7$; $F_{0,95}=2,1$) aux fortes concentrations chez *Ecdyonurus rothschildi*. Le colmatage des branchies réduit la résistance au courant dès que la teneur atteint 300g/l. Chez *Eoperla ochracea*, la méthode de contraste signale une augmentation de la sensibilité aux fortes concentrations et aux vitesses élevées ($F_{co}=29$; $F_{0,95}=4,1$). Le colmatage des branchies oblige l'animal à effectuer des mouvements respiratoires ("pompes") qui l'exposent davantage au courant. Par ailleurs, on note, de façon non significative, que le colmatage des bran-

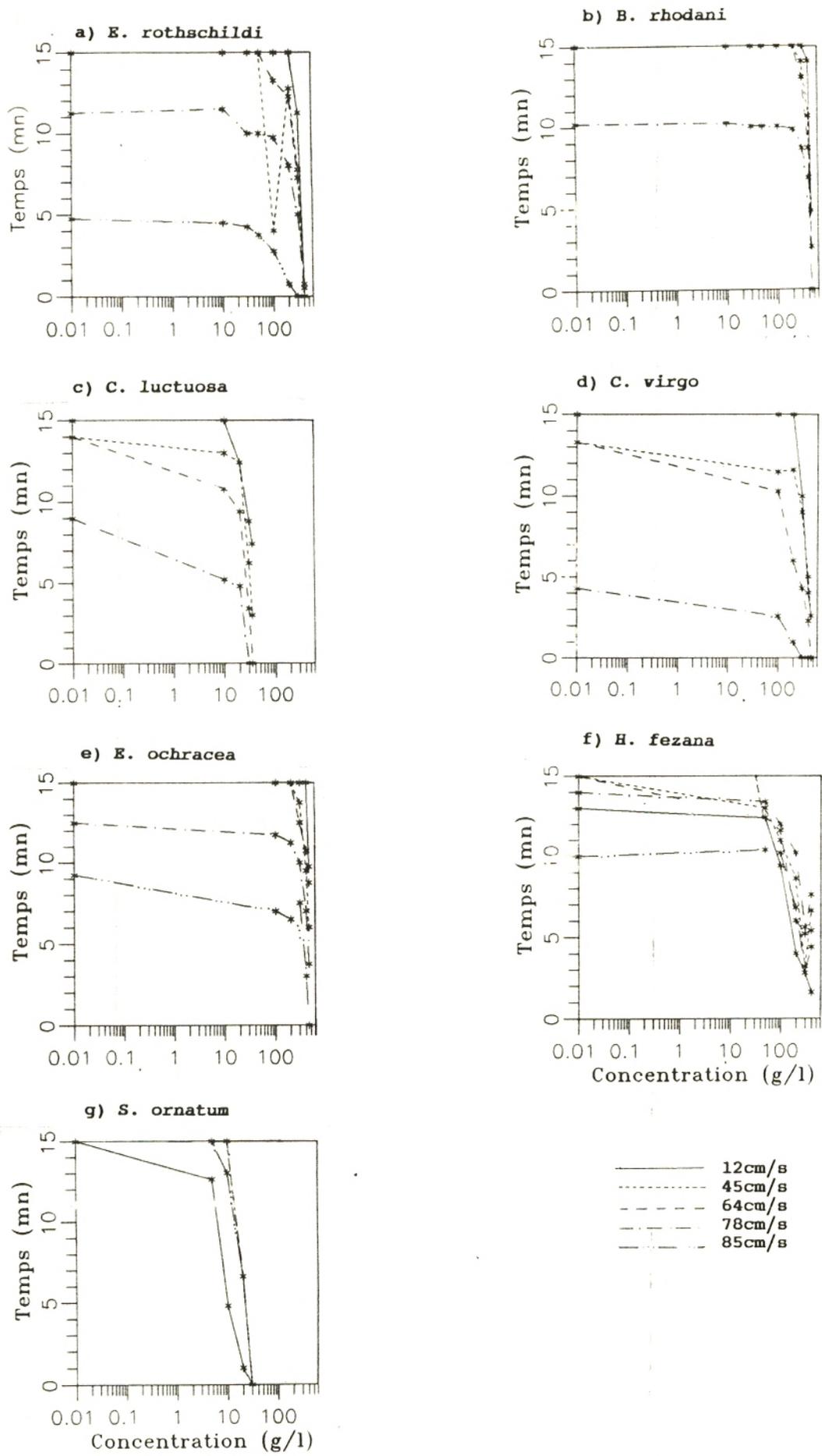


Fig.7. Effet combiné argile - Courant sur les larves

chies thoraciques aux faibles vitesses et aux fortes concentrations accroît le rythme des mouvements respiratoires (1 à 2 pompes/s) entraînant ainsi une fatigue qui provoque un décrochement plus rapide.

Chez *Hydropsyche fezana* et *Simulium ornatum*, organismes filtreurs, les vitesses lentes provoquent, de façon non significative, un décrochage plus rapide des larves pouvant s'expliquer par le colmatage de l'appareil filtreur chez *S.ornatum* entraînant un pourcentage de traumatismes significatif (70%) ($\chi^2=25$; $\chi_{0,95}=7,81$) où par un fin dépôt qui empêche l'adhérence au substrat (Nuttall et Bielby, 1973). De façon différente, le piégeage des sédiments par les fils de soie secrétés par *Hydropsyche* oblige l'animal à se surélever ce qui facilite son arrachement. D'autre part, nous avons observé des différences de comportement concernant le tissage des fils chez *H.fezana* en fonction de la vitesse (V) et de la concentration (C) (tableau 1).

Nous avons évalué l'activité des larves en estimant la surface tissée (S) et parallèlement, en dénombrant les fils secrétés (NB) disposés en spirale plus ou moins régulière. Nous supposons que l'absence d'angle dans la gouttière conduit l'animal à tisser de façon désordonnée afin d'augmenter ses possibilités d'accrochage.

C(g/l)	5		10	
	NB	S(mm ²)	NB	S(mm ²)
12	60	4	250	15
45	70	4	200	14
64	20	1	100	10
78	~0	0	~5	~0

Tableau 1 : Activité de tissage en fonction de la vitesse et des concentrations en MES.

L'activité de tissage va en décroissant avec la vitesse. Cependant on note une moindre activité à 5g/l qu'à 10g/l en liaison avec l'augmentation des déplacements.

En définitive, lorsque les conditions sont moins contraignantes l'animal est moins enclin à tisser.

- Conclusion

L'ensemble des observations nous permet de distinguer trois groupes d'espèces en fonction de leur sensibilité à l'argile. *S. ornatum* et *C. luctuosa* sont de loin les plus sensibles à la teneur en argile dans l'eau.

C. virgo, *H. fezana* et *E. rothschildi* forment un groupe qui n'est affecté par l'argile qu'aux fortes concentrations.

E. ochracea et *B. rhodani* sont les deux espèces les plus résistantes à l'argile. Brusven et Horning (1984) donnent l'exemple du Plécoptère *Pteronarcys californica* qui supporte très bien une suspension de cendres (granulométrie analogue à l'argile) à 2g/l pendant 15 jours.

4.3.2. Influence du limon fin

- Influence des concentrations (fig.8)

Ecdyonurus rothschildi (fig.8a) : réagit significativement aux limons fins à partir de 150g/l ($F=16,64$; $F_{0,95}=2,84$) et ne supporte pas une concentration supérieure à 300g/l. Cependant, l'effet s'accroît d'une concentration à une autre ($F_{co}=37$; $F_{0,95}=4,04$).

On n'observe pas de différence entre le premier et le troisième essai. En fin d'expérience, on ne constate la mort que de quelques animaux testés.

Baetis rhodani (fig.8b) : les larves de cette espèce ne montrent une réaction significative qu'à partir de 150g/l ($F=34,1$; $F_{0,95}=2,8$) et la totalité des larves décroche instantanément à 200g/l. Le temps d'exposition aux limons fins n'influe pas sur le comportement des larves.

Caenis luctuosa (fig.8c) : décroche significativement à partir de 30g/l ($F=5$; $F_{0,95}=2,8$). Ce décrochage est significativement plus rapide lorsqu'on augmente les concentrations ($F_{co}=5,06$;

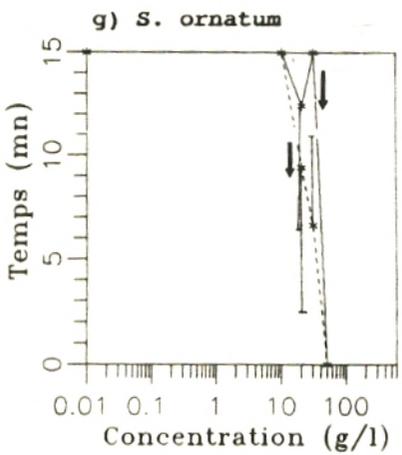
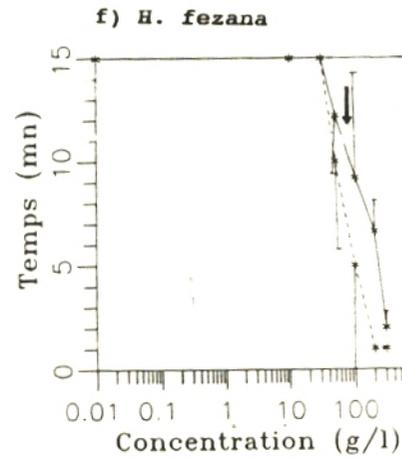
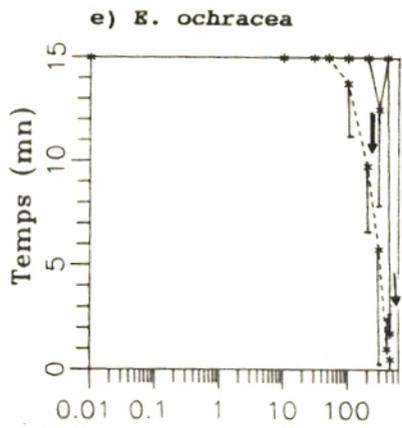
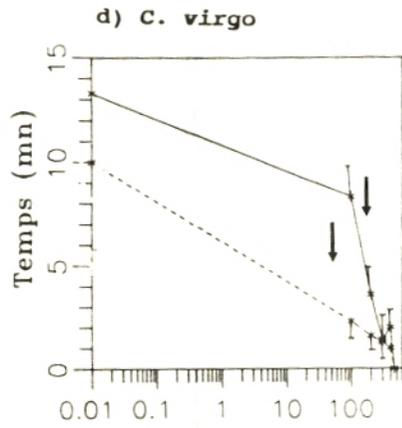
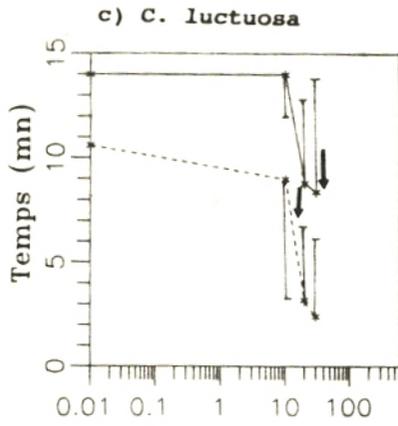
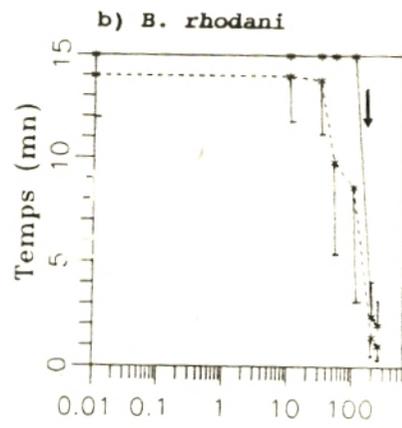
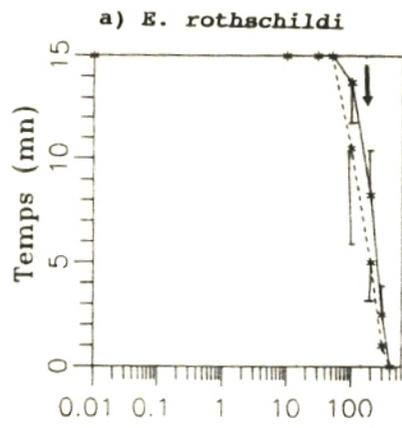
$F_{0,95}=4,04$). L'effet s'accroît au troisième essai puisque la concentration minimale significative s'abaisse à 15g/l avec différence significative entre le premier et troisième essai à partir de 20g/l ($F=8,47$; $F_{0,95}=4,2$). La totalité des larves meurt en fin d'expérience.

Calopteryx virgo (fig.8d) : ne présente pas de modification significative concernant le décrochage en deçà de 150g/l ($F=11,81$; $F_{0,95}=3,01$). L'absence totale de résistance aux limons fins s'observe pour 450g/l. La méthode de contraste montre, par ailleurs, que chaque variation de concentration provoque un effet significatif ($F_{co}=16,6$; $F_{0,95}=2,8$). La sensibilité des larves augmente significativement avec le temps d'exposition. Au troisième essai ($F=8,4$; $F_{0,95}=4,26$), la charge minimale provoquant un effet significatif n'est que de 50g/l.

Eoperla ochracea (fig.8e) : jusqu'à 410g/l *E. ochracea* ne présente pas de réaction significative aux limons fins ($F=4,19$; $F_{0,95}=2,53$) mais pour 450g/l les larves ne s'accrochent plus. Selon l'ANOVA 2, la sensibilité croît de façon hautement significative après trois essais ($F=42,5$; $F_{0,95}=2,5$). De plus, l'interaction entre le temps d'exposition et les concentrations est significative ($F_1=6,93$; $F_{0,95}=2,61$). Par conséquent, la plus petite concentration significative est de 250g/l.

Hydropsyche fezana (fig.8f) : aucune réaction significative n'est observée en dessous de 100g/l ($F=43,92$; $F_{0,95}=3,2$). La concentration maximale supportée est de 400g/l. Le décrochage est plus rapide au troisième essai avec une différence significative entre le premier essai et celui-ci ($F=6,53$; $F_{0,95}=4,08$).

Simulium ornatum (fig.8g) : les larves de Simulies réagissent significativement aux concentrations en limon fin dès 45g/l ($F=2,9$; $F_{0,95}=2,8$). A 50g/l aucune larve n'accroche et toutes sont traumatisées et ne peuvent être réutilisées pour les essais suivants. On constate aussi une plus grande sensibilité au troisième essai puisque la concentration minimale significative devient 15g/l. Autrement dit, il existe une différence



— 1^{ère} mesure
 - - - 3^{ème} mesure
 ↓ Concentration minimale significative

Fig.8. Influence du limon fin

significative entre le premier et le troisième essai ($F=5,34$; $F_{0,95}=4,17$).

- Effet combiné des limons fins et du courant (fig.9)

Seules deux espèces (*B. rhodani* et *E. rothschildi*) présentent des réponses significativement positives à l'effet combiné des fortes concentrations en limon fin et du courant. Pour *B. rhodani*, l'effet s'accroît ($F_I=5,9$; $F_{0,95}=2,34$) à partir de 64cm/s. Pour *E. rothschildi*, l'interaction n'est significative qu'à partir de 300g/l ($F_I=6,01$; $F_{0,95}=2,01$). Cette teneur représente la concentration limite supportée par les larves.

La combinaison des deux facteurs ne présente pas d'interaction significative pour les autres espèces. La méthode de contraste montre cependant, que la sensibilité aux courants rapides (≥ 78 cm/s) chez *Eoperla ochracea* croît avec la concentration ($F_{co}=5,4$; $F_{0,95}=4,1$).

Pour *S. ornatum* et *H. fezana*, nous observons de façon non significative une plus grande sensibilité aux limons fins aux faibles vitesses. L'explication est identique à celle déjà donnée pour les argiles. Par contre, aux fortes vitesses, *S. ornatum* ne réagit pas aux variations combinées des limons fins et du courant pour les charges inférieures à 40g/l.

- Conclusion

C. luctuosa et *S. ornatum* sont les plus sensibles aux limons fins. *C. virgo*, *B. rhodani* et *H. fezana* présentent une sensibilité plus importante que *E. rothschildi* et *E. ochracea* qui ne sont affectées que par les fortes concentrations et les vitesses élevées.

4.3.3. Influence du limon grossier

- Influence des concentrations (fig.10)

Ecdyonurus rothschildi (fig.10a) : exposées au limon grossier, les larves de cette espèce ne réagissent significativement qu'à partir de 100g/l ($F=48,24$; $F_{0,95}=2,84$). Au delà de 250g/l, on

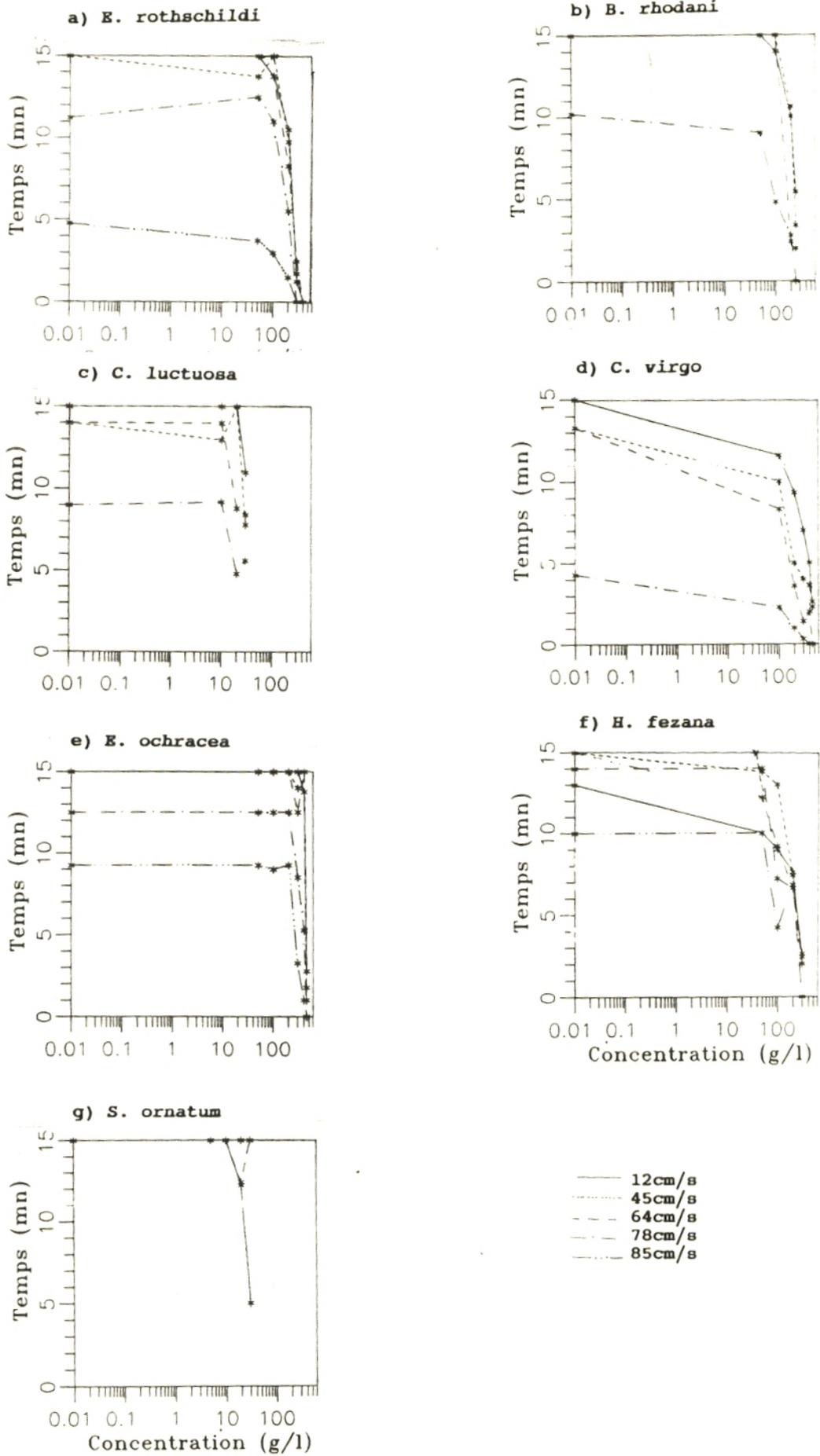


Fig.9. Effet combiné limon fin - Courant sur les larves

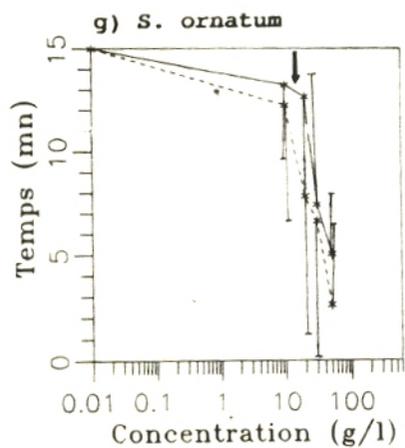
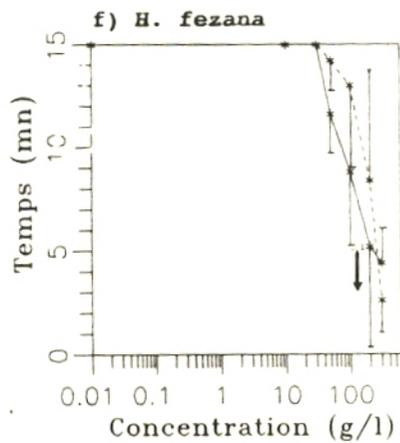
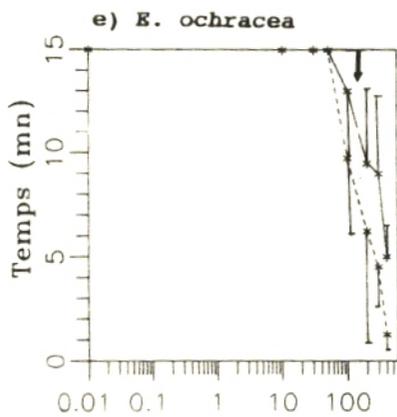
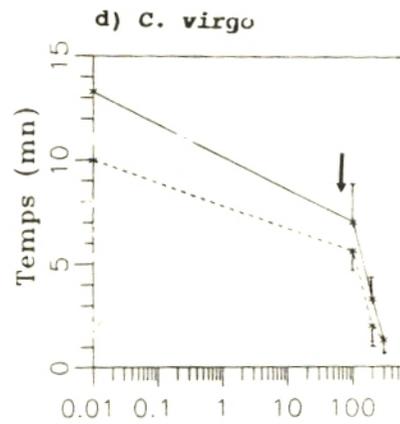
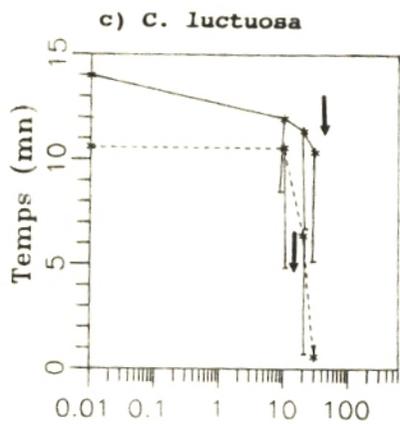
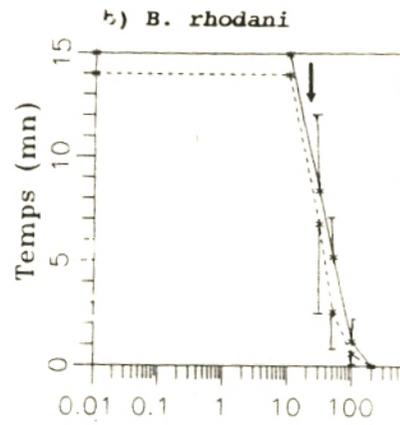
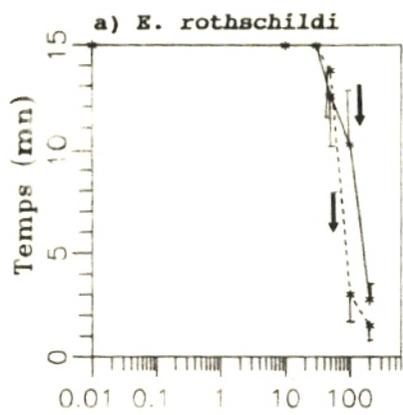
n'observe plus de résistance. Selon la méthode de contraste, chaque variation de concentration provoque d'une façon hautement significative un décrochage plus rapide ($F_{co}=62$; $F_{0,95}=4,08$) De plus, lorsque l'expérience se prolonge (3^e essai) on constate une plus grande sensibilité des larves (concentration minimale significative : 75g/l). En effet, la différence observée entre le premier et le troisième essai est toujours significative ($f=4,2$; $F_{0,95}=4,2$) avec une interaction entre le temps d'exposition et le facteur concentration également significative ($F_T=3,08$; $F_{0,95}=3,01$). Autrement dit, plus on augmente les concentrations en limon grossier, plus l'influence du temps d'exposition est grande.

Baetis rhodani (fig.10b) : la concentration minimale provoquant un décrochage significatif, est de 30g/l ($F=247$; $F_{0,95}=2,8$) et la concentration maximale utilisée est de 100g/l. En outre, la sensibilité est significativement plus importante d'une concentration à une autre ($F_{co}=23,2$; $F_{0,95}=4,08$). Cependant, on n'observe pas de différence de comportement entre le premier et le troisième essai.

Caenis luctuosa (fig10c) : cette espèce réagit significativement aux limons grossiers dès 35g/l au premier essai ($F=3,56$; $F_{0,95}=2,8$) et dès 20g/l au troisième essai. A partir de cette concentration, le temps d'exposition au limon grossier influe significativement sur le comportement des larves ($F=9,17$; $F_{0,95}=4,17$).

Calopteryx virgo (fig.10d) : décroche significativement à partir de 100g/l ($F=24,6$; $F_{0,95}=3,01$) et ne s'accroche plus quand la teneur atteint 400g/l. La méthode de contraste, nous révèle toutefois, que chaque augmentation de concentration a une influence significativement plus grande ($F_{co}=7,6$; $F_{0,95}=3,55$). Au troisième essai, on n'observe pas de différence significative.

Eoperla ochracea (fig.10e) : la sensibilité au limon grossier est significative à partir de 150g/l ($F=13,2$; $F_{0,95}=2,5$) et ne varie pas significativement avec l'augmentation des concentra-



— 1^{ère} mesure
 - - - 3^{ème} mesure
 ↓ Concentration minimale significative

Fig.10. Influence du limon grossier

tions. La résistance limite est atteinte pour 400g/l. L'influence du temps d'exposition des larves au limon grossier est significativement, ($F=6,68$; $F_{0,95}=4,17$) mais pas l'interaction des deux facteurs temps et concentration.

Hydropsyche fezana (fig.10f) : les larves de cette espèce décrochent d'une façon significative à partir de 200g/l. A 300g/l, elles ne résistent plus. Notons, par ailleurs, une meilleure résistance de ces larves au troisième essai qui est dû à une variation individuelle.

Simulium ornatum (fig.10g) : réagit significativement dès la concentration de 20g/l ($F=7$; $F_{0,95}=2,76$) et ne supporte pas des teneurs supérieures à 50g/l. L'effet est significativement plus accentué lorsqu'on augmente la concentration ($F_{co}=11,7$; $F_{0,95}=4,04$) En revanche, il ne varie pas significativement au troisième essai.

- Effet combiné des limons grossiers et du courant (fig.11)

Les animaux n'ont pas été testés à la vitesse de 12cm/s car les particules se déposaient à cette vitesse.

Les larves de *B. rhodani*, de *C. virgo* et d'*E. rothschildi* réagissent significativement à l'action combiné des deux facteurs respectivement ($F_I=4,26$; $F_{0,95}=2,3$, $F_I=2,89$; $F_{0,95}=2,51$, $F_I=2,35$; $F_{0,95}=2,25$). C'est-à-dire : plus la vitesse augmente plus les larves sont sensibles à l'augmentation des concentrations. On observe à la vitesse de 78cm/s que la concentration maximale passe de 200 à 100g/l pour *B. rhodani* et de 400 à 300g/l pour *C. virgo*. Pour les autres espèces, on n'observe pas d'interaction significative entre les deux facteurs.

On remarque, de façon non significative, que la résistance aux limons grossiers décroît avec la vitesse chez *H. fezana* et *S. ornatum* . Par ailleurs, chez *C. luctuosa*, malgré l'absence d'interaction, on constate à 78cm/s, que le nombre d'individus traumatisés (pattes ou plaques branchiales arrachées) diffère significativement par rapport, à celui observé aux vitesses inférieures ($\chi_2=7,7$; $\chi_2=5,9$) à 5% de risque.

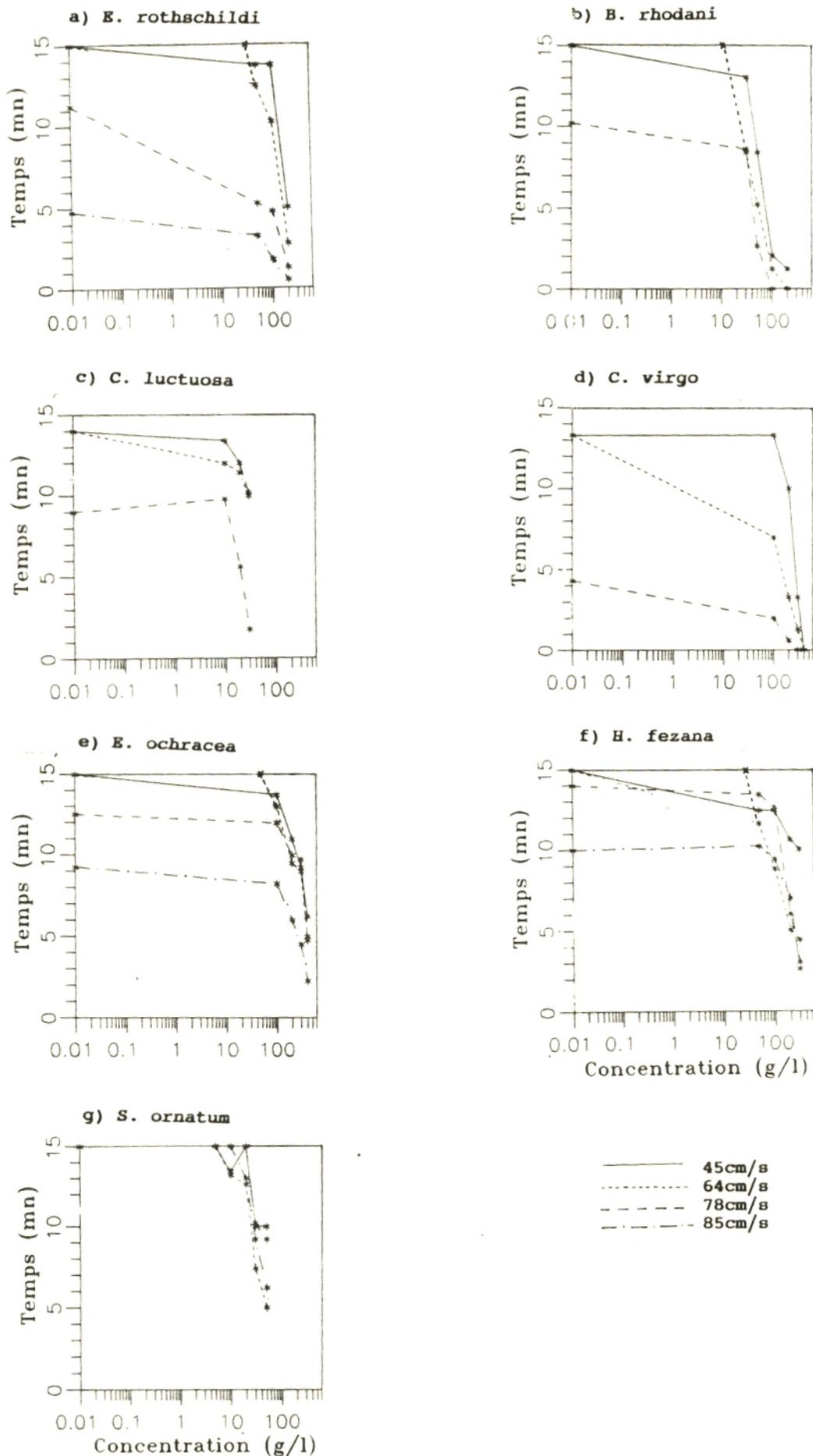


Fig.11. Effet combiné limon grossier - Courant sur les larves

- Conclusion

Les limons grossiers agissent davantage sur *C. luctuosa*, *S. ornatum* et *B. rhodani* que sur *E. rothschildi*. On note une plus grande sensibilité aux limons grossiers et aux vitesses élevées chez les espèces à branchies lamellaires (Ephéméroptères et Odonates). L'effet abrasif des particules est probablement la cause des traumatismes qui entraînent le décrochage des larves. *E. ochracea* et *H. fezana* sont les deux espèces offrant la meilleure résistance à ce type de MES.

4.3.4. Influence du sable fin

- Influence des concentrations (fig.12)

Ecdyonurus rothschildi (fig.12a) : réagit significativement à partir de 75g/l ($F=96,3$; $F_{0,95}=2,8$). Cet Ephéméroptère ne tolère pas des concentrations supérieures à 200g/l. On constate que la sensibilité au sable fin augmente avec le temps d'exposition. En effet, aux faibles concentrations, on note une différence significative entre le premier et le troisième essai ($F=5,83$; $F_{0,95}=4,26$) avec une charge minimale de 30g/l.

Baetis rhodani (fig.12b) : dès 25g/l, le nombre de larves qui décrochent devient fortement significatif ($F=256$; $F_{0,95}=2,8$), cependant, elles résistent jusqu'à 100g/l.

Caenis luctuosa (fig.12c) : au premier essai, les larves décrochent significativement à 15g/l ($F=83,68$; $F_{0,95}=2,76$). 20g/l semble être la concentration maximale pour ces organismes. Au troisième essai, donc après un maximum de 45mn d'exposition, les larves de *Caenis* décrochent plus rapidement à partir de 5g/l. La différence entre le premier et le troisième essai est hautement significative ($F=63,61$, $F_{0,95}=4,17$) et l'interaction entre le temps d'exposition et les concentrations est également significative ($F_1=8,06$; $F_{0,95}=2,92$). Cette grande sensibilité au sable fin se traduit par le fait, que 30% d'animaux ont perdu leurs pattes.

Calopteryx virgo (fig.12d) : cette espèce réagit significative-

ment à partir de 30g/l, ($F=73,2$; $F_{0,95}=3,01$) mais résiste partiellement jusqu'à 200g/l. Le temps n'influe pas sur la sensibilité au sable fin.

Eoperla ochracea (fig.12e) : les larves d'*Eoperla* décrochent de façon significative à partir de 75g/l ($F=42,7$; $F_{0,95}=2,53$) mais supportent jusqu'à 300g/l. On ne décèle pas de différence de comportement significative entre le premier et le troisième essai.

Hydropsyche fezana (fig.12f) : à partir de 35g/l, les larves d'*hydropsyche* réagissent très significativement ($F=198$; $F_{0,95}=2,53$) au sable fin. Cette réaction demeure constante quelle que soit la concentration utilisée et quel que soit le temps d'exposition (pas de différence significative entre le premier et le troisième essai). 200g/l constitue la teneur maximale.

Simulium ornatum (fig.12g) : la méthode de Dunett indique qu'à 15g/l, au premier essai, les larves de Simulies décrochent de façon significative par rapport au témoin. Mais ce n'est qu'à partir de 30g/l que l'augmentation de la concentration a un effet significativement plus rapide ($F_{co}=10,10$; $F_{0,95}=4,04$). Au troisième essai, la concentration minimale significative est de 5g/l. Pour toutes les concentrations utilisées, le temps d'exposition influe significativement ($F_I=2,83$; $F_{0,95}=2,40$). Cette sensibilité accrue au sable fin, est traduite par une différence significative du nombre d'animaux traumatisés entre les deux essais ($\chi_2 = 102$; $\chi_{0,95} = 5$).

Pour *Simulium ornatum* nous avons considéré qu'une larve était traumatisée dès qu'elle était dans l'impossibilité de déposer sa goutte de soie ou que cette goutte n'accrochait pas au substrat, en raison de l'abrasion par les particules de sable fin.

La grande sensibilité de ce groupe serait due à cette réduction de possibilité d'accrochage, ce qui se traduit par une dérive accrue.

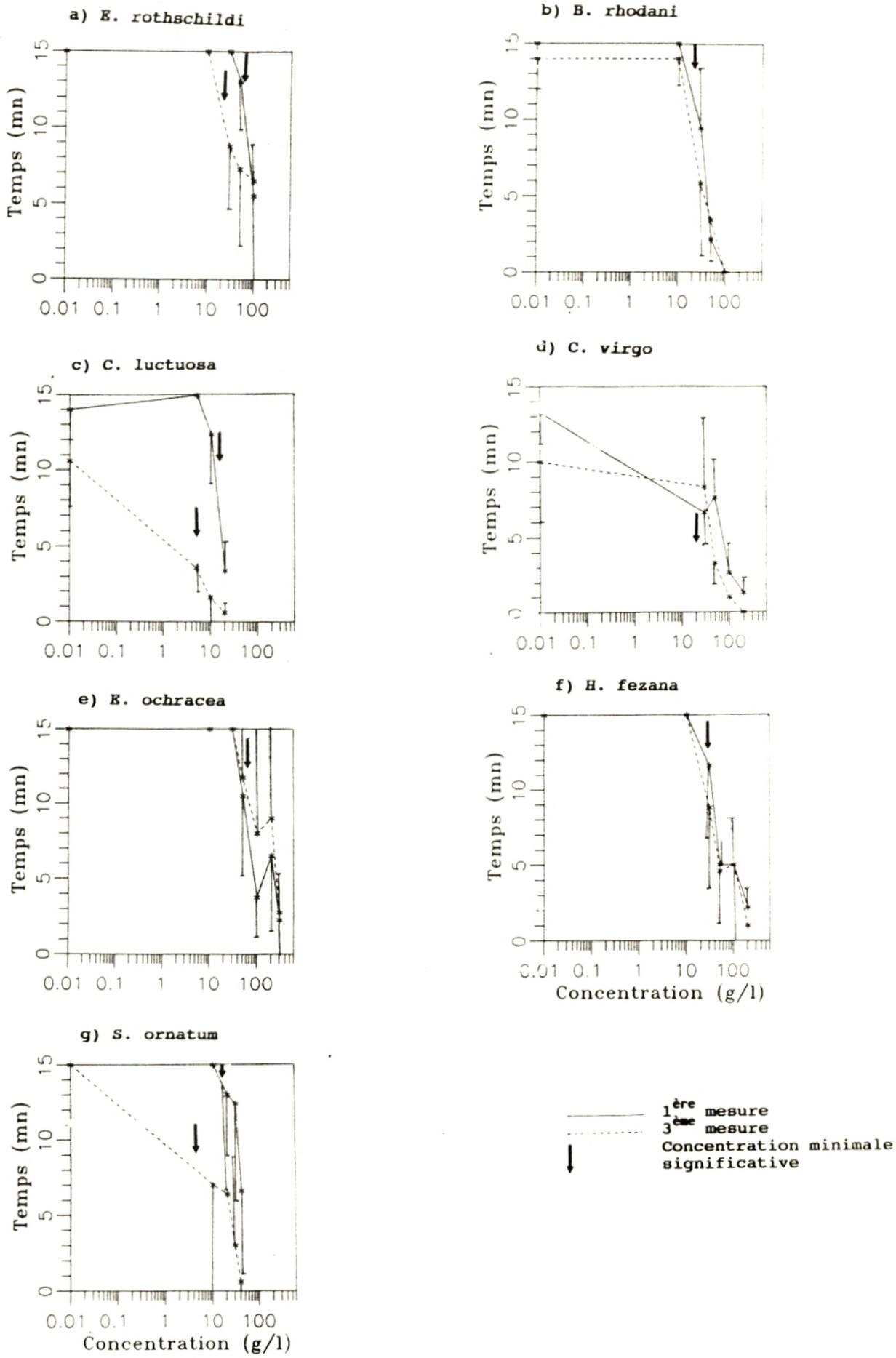


Fig.12. Influence du sable fin

- Effet combiné du sable fin et du courant (fig.13)

De même que pour les limons grossiers, la vitesse de 12cm/s n'a pas été testée en raison du dépôt des particules qui ne peuvent être maintenues en suspension.

On n'observe pas d'interaction significative entre le courant et les concentrations en sable fin pour *E. ochracea* et *S. ornatum*. Cependant, la méthode de contraste indique que chez *E. ochracea* le courant agit significativement par sa présence seulement ($F_{co}=17,3$; $F_{0,95}=4,1$) autrement dit, l'influence des vitesses croissantes n'est pas significative.

Pour *S. ornatum*, l'influence du courant en présence de sable fin ne se traduit que par un χ_2 significatif ($\chi_2=101,9$; $\chi_{20,95} =11,07$) des larves éliminées. Ce nombre augmente d'une vitesse à une autre et atteint 75% à 85cm/s. Ce qui indique que le flux de sable fin en suspension est responsable d'une dérive plus importante aux vitesses élevées.

Pour les autres espèces, l'interaction entre les deux facteurs est significative.

La combinaison du courant et du sable fin, semble avoir le plus d'effet sur les larves de *B. rhodani* ($F_I=10,75$; $F_{0,95}=2,3$). La dérive s'accroît de façon considérable à mesure que la vitesse du courant et la concentration en sable fin augmentent.

Pour *C. luctuosa*, l'addition de sable fin dans un courant rapide (78cm/s) provoque l'arrachement plus rapide des larves. Selon l'ANOVA 2, au premier essai, l'interaction devient plus nette ($F_I=7,3$; $F_{0,95}=2,34$) et on constate que 30% des individus ont des pattes arrachées.

Pour *E. rothschildi*, l'interaction est très significative ($F_I=6,9$; $F_{0,95}=2,12$). A 64cm/s, l'effet du sable fin ne se fait sentir qu'aux fortes concentrations. Au delà de 78cm/s, le sable fin agit dès les faibles concentrations.

A noter qu'à 45cm/s, *E. rothschildi* décroche plus facilement qu'à 64cm/s, car à cette vitesse, plus faible, les particules se déposent et rendent le substrat défavorable aux larves (Tebo, 1955; Chutter, 1969; Hynes, 1973), tandis qu'à 64cm/s,

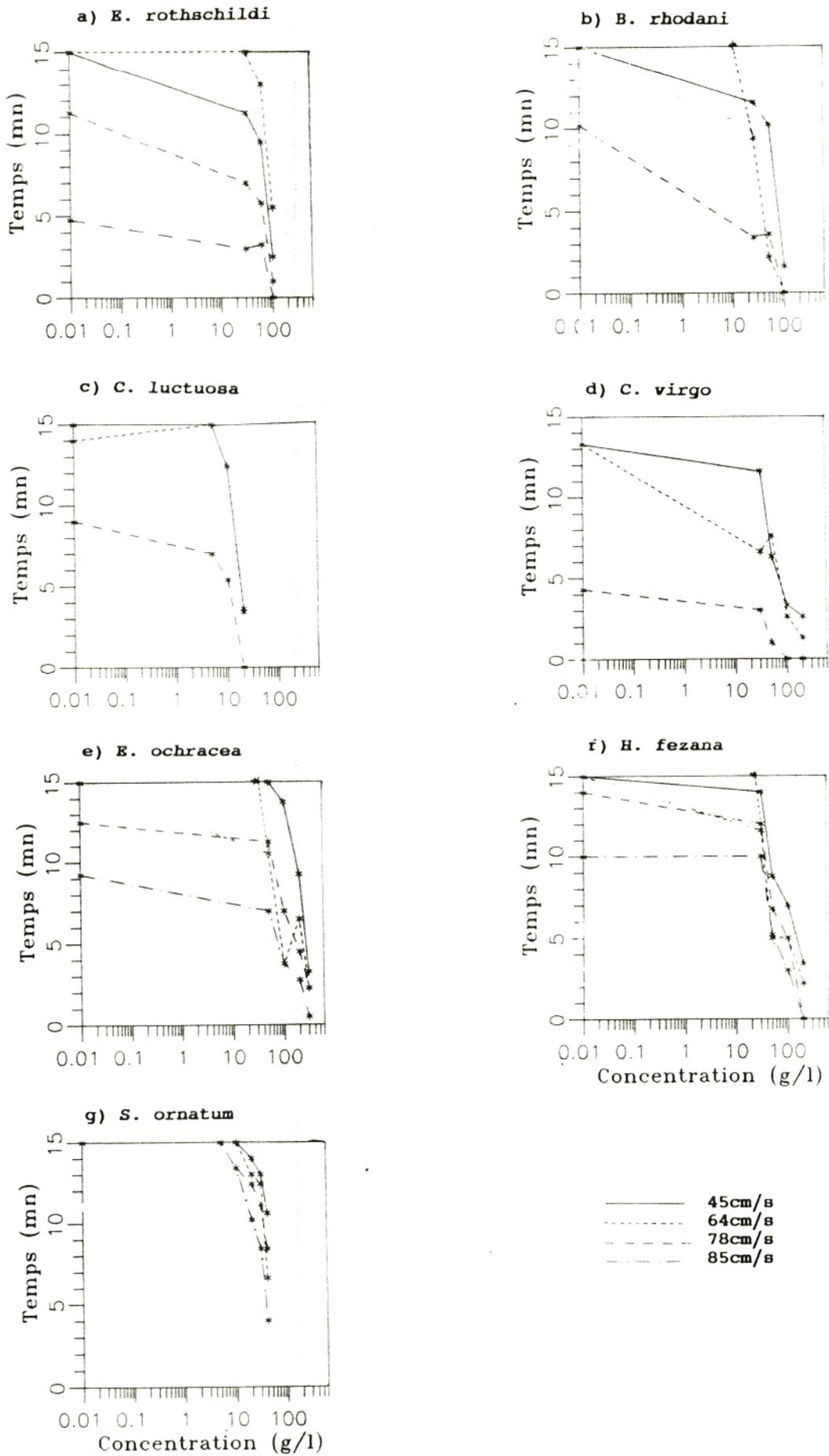


Fig.13. Effet combiné sable fin - Courant sur les larves

le substrat est sans cesse nettoyé.

Calopteryx virgo réagit significativement à l'effet combiné du sable fin et du courant ($F_1=4,1$; $F_{0,95}=2,51$). L'addition du sable fin, même à concentration relativement faible, dans un courant rapide (64-78cm/s) provoque des décrochages significatifs des larves de cet odonate.

Hydropsyche fezana est significativement sensible à la combinaison des deux facteurs ($F_1=4,4$; $F_{0,95}=1,9$). Plus la vitesse et les concentrations augmentent, plus la dérive s'accroît (réduction du temps d'accrochage).

- Conclusion

Le sable fin, par son effet abrasif, devient un facteur défavorable aux larves d'insectes effet d'autant plus accentué que la vitesse du courant et la concentration augmentent.

La majorité des espèces testées sont très sensibles au sable fin avec des tolérances plus ou moins grandes.

S. ornatum, *B. rhodani*, *C. virgo* et *H. fezana* résistent le plus mal au sable fin. *E. rothschildi* supporte légèrement mieux. *E. ochracea* résiste le mieux à ce type de particules, probablement en raison de ses téguments robustes et de la position protégée des branchies.

4.3.5. Influence du sable grossier (fig.14)

- Influence des concentrations

Ecdyonurus rothschildi (fig.14a) : réagit significativement à partir de 1g/l ($F=98$; $F_{0,95}=2,6$) et décroche instantanément à 10g/l quel que soit le temps d'exposition. On n'observe aucune différence significative entre le premier et le troisième essai

Baetis rhodani (fig.14b) : les larves de cette espèce réagissent très fortement à de faibles variations des concentrations du sable grossier ($F=457,6$; $F_{0,95}=2,53$). La plus petite concentration significative est de 1g/l et la concentration maximale supportée par les larves est de 5g/l. De plus, l'effet

varie significativement d'une concentration à l'autre ($F_{co}=64,8$; $F_{0,95}=4,26$). Au troisième essai, la concentration minimale significative est de 500mg/l, d'où l'existence d'une différence significative entre le premier et le troisième essai ($F=7,61$; $F_{0,95}=4,17$).

Caenis luctuosa (fig.14c) : réagit très significativement à partir de 750mg/l ($F=71$; $F_{0,95}=2,6$) et ne résiste plus à 2g/l. Cette sensibilité selon la méthode de contraste, augmente avec les concentrations du sable grossier ($F_{co}=12,35$, $F_{0,95}=4,26$) d'une part et avec le temps d'exposition d'autre part. Car au troisième essai, les larves réagissent significativement à partir de 250mg/l, avec l'existence d'une interaction significative entre le temps d'exposition et les concentrations ($F_I=9,12$; $F_{0,95}=2,6$).

Calopteryx virgo (fig.14d) : décroche d'une façon significative à partir de 2g/l ($F=45,9$; $F_{0,95}=4,35$) et immédiatement à partir de 10g/l. Le temps d'exposition influe significativement en présence du sable grossier ($F=11,2$; $F_{0,95}=4,35$).

Eoperla ochracea (fig.14e) : cette espèce est sensible significativement au sable grossier à partir de 2,5g/l ($F=18,2$; $F_{0,95}=3,23$), mais résiste jusqu'à 20g/l. Il n'y a pas de différence significative entre le premier et le troisième essai.

Hydropsyche fezana (fig.14f) : réagit significativement à partir de 15g/l ($F=218,9$; $F_{0,95}=2,5$). 50g/l, semble être la concentration maximale pour cette espèce. Au troisième essai, la sensibilité s'accroît légèrement aux fortes concentrations puisque les larves réagissent significativement à partir de 12g/l. De plus, l'écart qui existe entre le premier et le troisième essai est significatif ($F=9,7$; $F_{0,95}=4,08$).

Simulium ornatum (fig.14g) : les larves sont sensibles significativement dès 10g/l ($F=31,5$; $F_{0,95}=2,76$). A partir de ce seuil, elles décrochent instantanément au troisième essai d'où une différence significative entre le premier et le troisième essai ($F=14,75$; $F_{0,95}=4,17$). De plus, la concentration minimale significative est réduite à 2,5g/l, après 45mn d'exposition.

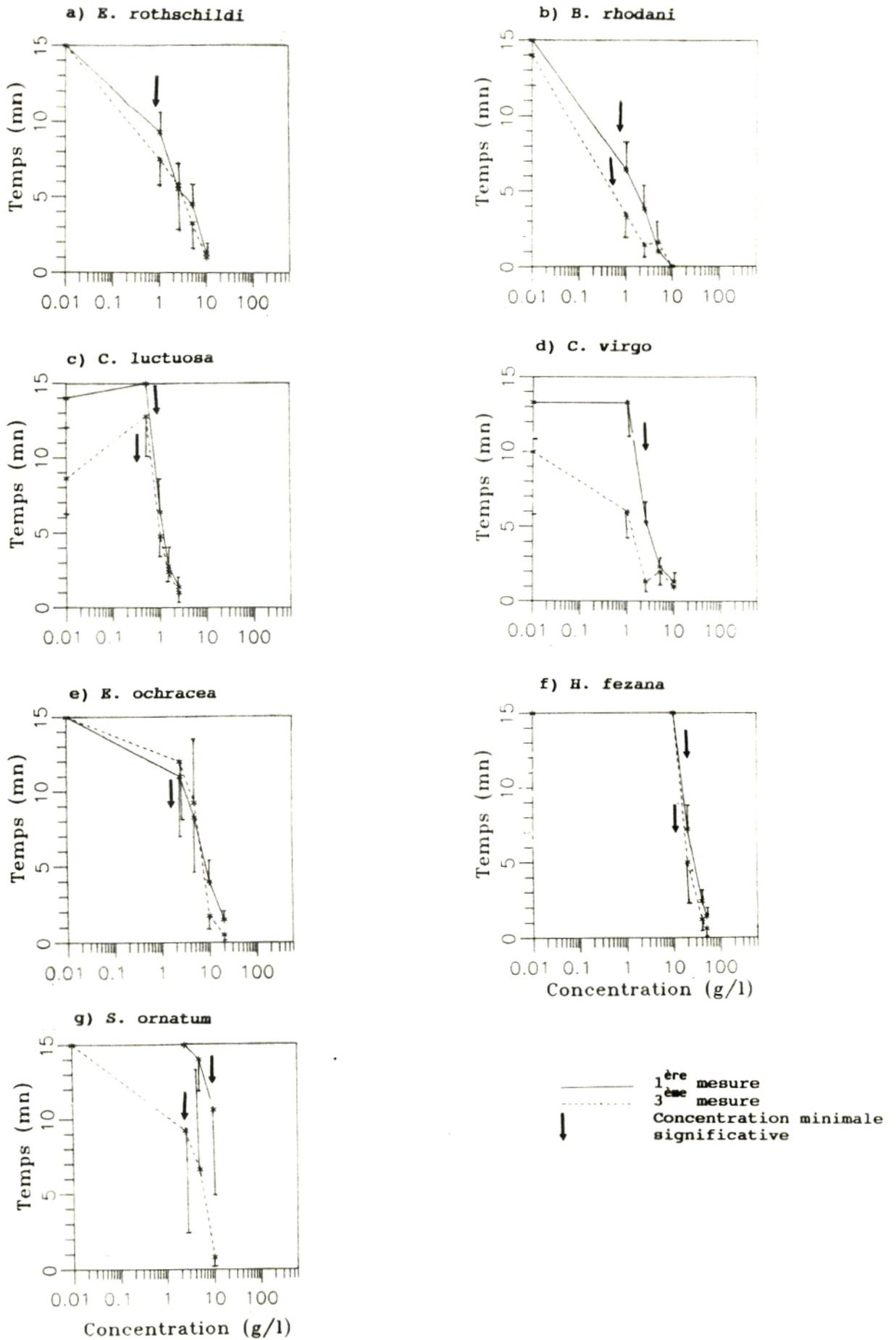


Fig.14. Influence du sable grossier

- Effet combiné du sable grossier et du courant (fig.15)

Les sables n'ont pu être testées aux vitesses inférieures à 64cm/s, car celles-ci ne permettent pas la mise en suspension des grains de sable.

L'interaction des deux facteurs est très significative pour toutes les espèces testées. Plus la vitesse augmente et plus l'effet du sable se traduit par le décrochage des larves. Elle est hautement significative pour *Baetis rhodani* ($F_1=51,4$; $F_{0,95}=2,10$), *Simulium ornatum* ($F_1=31,5$; $F_{0,95}=2,34$), *Hydropsyche fezana* ($F_1=10,9$; $F_{0,95}=2,02$), *Caenis luctuosa* ($F_1=7,8$; $F_{0,95}=2,6$), *Calopteryx virgo* ($F_1=7,1$; $F_{0,95}=2,87$) et *Ecdyonurus rothschildi* ($F_1=6,7$; $F_{0,95}=2,18$), moins significative pour *Eoperla ochracea* ($F_1=5$; $F_{0,95}=2,18$).

- Conclusion

Le sable grossier agit sur les larves d'insectes à faible concentration. Les vitesses élevées ainsi que le temps d'exposition accentuent son influence. La dérive est provoquée essentiellement, par l'effet mécanique et abrasif des particules.

4.3.6. Effet du mélange

- Influence des concentrations (fig.16)

Ecdyonurus rothschildi (fig.16a) : les larves réagissent significativement au mélange, dès 20g/l ($F=11,87$; $F_{0,95}=3,06$) au premier essai et dès 40g/l au troisième essai. A partir de 150g/l, les larves décrochent très rapidement.

Baetis rhodani (fig.16b) , réagit significativement à partir de 50g/l ($F=3,87$; $F_{0,95}=2,9$), mais supporte très faiblement la concentration de 200g/l. Au troisième essai, la sensibilité s'accroît et les larves dérivent significativement à 25g/l d'où une différence significative entre le premier et le troisième essai ($F=16,5$; $F_{0,95}=4,08$).

Caenis luctuosa (fig.16c) : cette espèce décroche significativement dès 10g/l ($F=10,2$; $F_{0,95}=3,24$) et elle ne supporte plus de

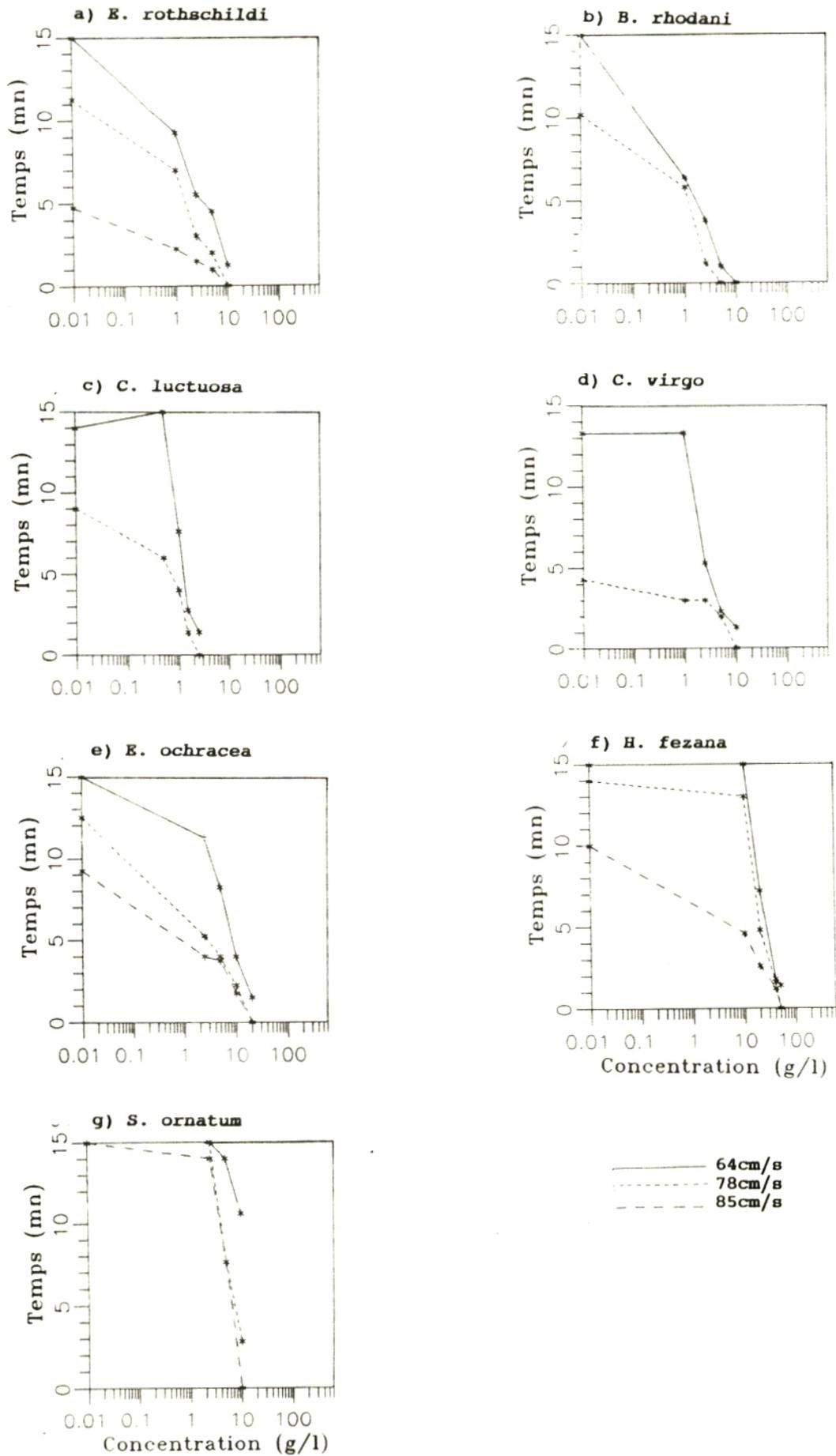


Fig.15. Effet combiné sable grossier - Courant sur les larves

concentrations supérieures à 20g/l. Le temps d'exposition n'influe pas significativement sur la résistance.

Calopteryx virgo (fig.16d), au premier essai, les larves de cette espèce ne présentent de différences de comportement significatives qu'à 50g/l ($F=16,6$; $F_{0,95}=3,1$). Par contre, au troisième essai, la résistance est moindre. La concentration minimale significative est de 25g/l et on observe une différence significative entre le premier et le troisième essai ($F=11,24$; $F_{0,95}=4,1$). Cependant, l'interaction entre le temps d'exposition et la variation des concentrations est nulle.

Eoperla ochracea (fig.16e) : cette espèce montre une réaction significative au mélange à partir de 125g/l ($F=5,9$; $F_{0,95}=3,06$).

Hydropsyche fezana (fig.16f) : à 30g/l, les larves d'Hydropsyche montrent un décrochage significatif ($F=12,8$; $F_{0,95}=2,8$). A partir de 150g/l, les larves résistent très peu de temps.

Simulium ornatum (fig.16g) , réagit significativement dès 15g/l au premier essai ($F=4,06$; $F_{0,95}=2,8$) et dès 7g/l au troisième essai. Le temps d'exposition influe d'une façon significative ($F=5$; $F_{0,95}=4,08$).

- Remarque

Chez *E. ochracea* , *H. fezana* et *E. rothschildi*, on observe de façon non significative une meilleure tolérance au mélange, au troisième essai, sauf aux concentrations élevées où la charge en sable exerce une action prépondérante.

L'interaction entre la vitesse du courant et la charge en MES n'a pas été testée pour le mélange.

- Conclusion

Deux espèces (*S. ornatum* et *C. luctuosa*) réagissent fortement au mélange. L'odonate *C. virgo* et l'éphéméroptère *B. rhodani* résistent au mélange quand la concentration est faible. *E. ochracea*, *E. rothschildi* et *H. fezana* ont un comportement à peu près identique vis-à-vis du mélange et présentent une

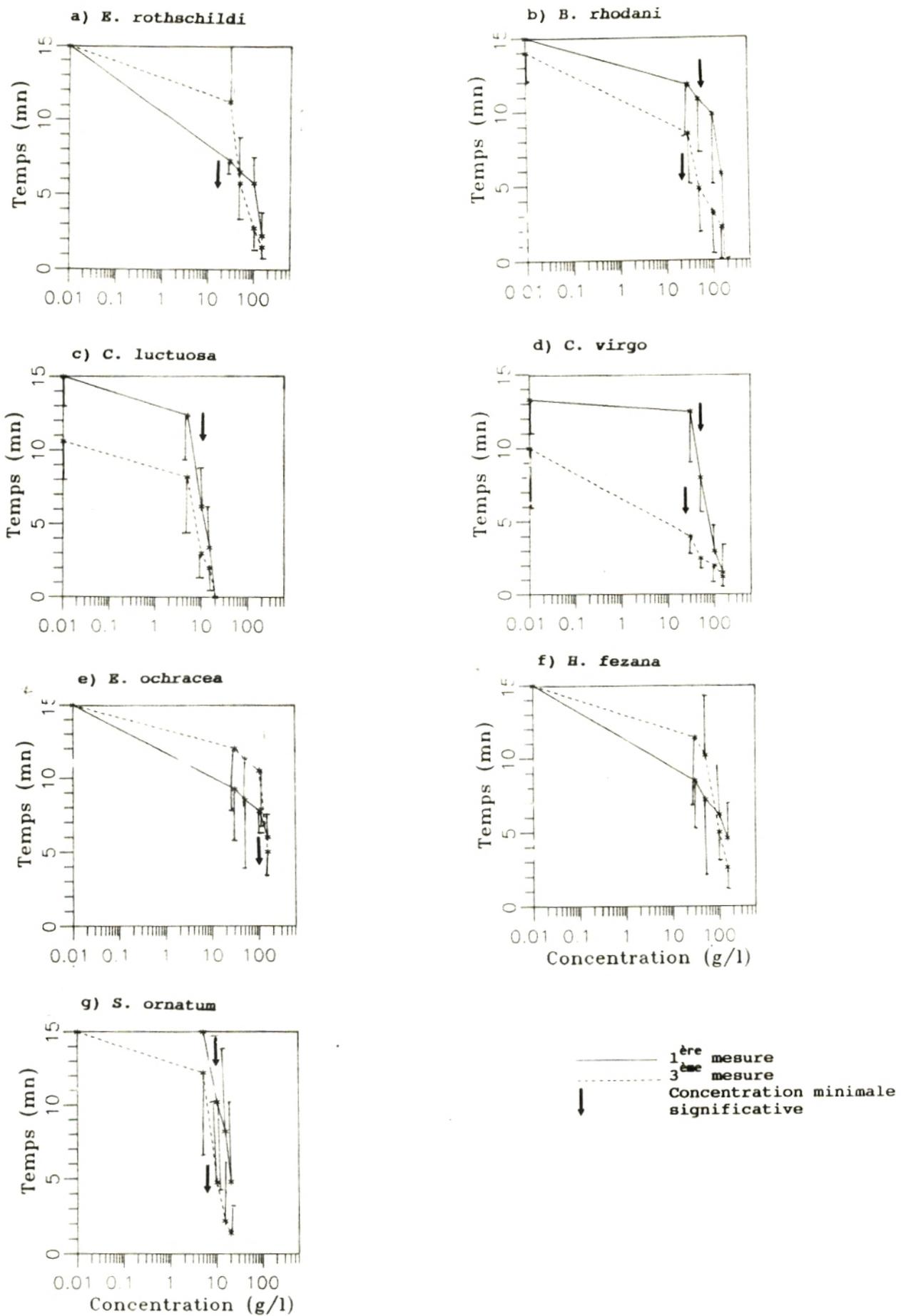


Fig.16. Influence du mélange

meilleure résistance.

Le mélange a un effet néfaste sur la majorité des espèces.

5. Discussion

Les espèces étudiées réagissent aux MES en fonction de deux types de paramètres :

- Ceux indépendants de l'espèce : la taille et les concentrations des particules et la vitesse du courant.
- Ceux propres à l'espèce : la taille des individus, la morphologie et l'écologie.

5.1. Les facteurs indépendants de l'espèce

5.1.1. Influence de la taille des particules

Afin de visualiser l'influence de la granulométrie des MES, nous avons représenté les concentrations maximales et minimales (fig.18). Par ailleurs, nous avons déterminé pour chaque fraction la concentration correspondant à un temps de décrochage moyen, obtenu à partir du temps minimal correspondant à la concentration maximale à laquelle il n'y a pas d'accrochage ($t=0$) et du temps maximal correspondant à la concentration minimale en dessous de laquelle il n'y a pas de décrochage. Le point temps moyen est déterminé comme étant le milieu du segment temps minimal - temps maximal. A partir de ce point, on détermine la concentration (C') correspondante au temps moyen (cf courbe théorique fig.17a). Cette concentration (C') est différente suivant le type de courbe, donc suivant le type de réaction des organismes (Fig.17b) et peut être proche de la concentration minimale (C'_1), de la concentration maximale (C'_3) ou alors d'une concentration intermédiaire (C'_2). Tout ceci va se traduire sur le graphe final, ((C)/fraction) par une troisième courbe, (courbe moyenne) située entre les courbes minimales et les courbes maximales. La position de cette courbe par rapport aux deux extrêmes nous renseigne sur l'importance de l'effet de chacune des fractions (fig.18).

On peut distinguer deux types de comportement chez les larves étudiées :

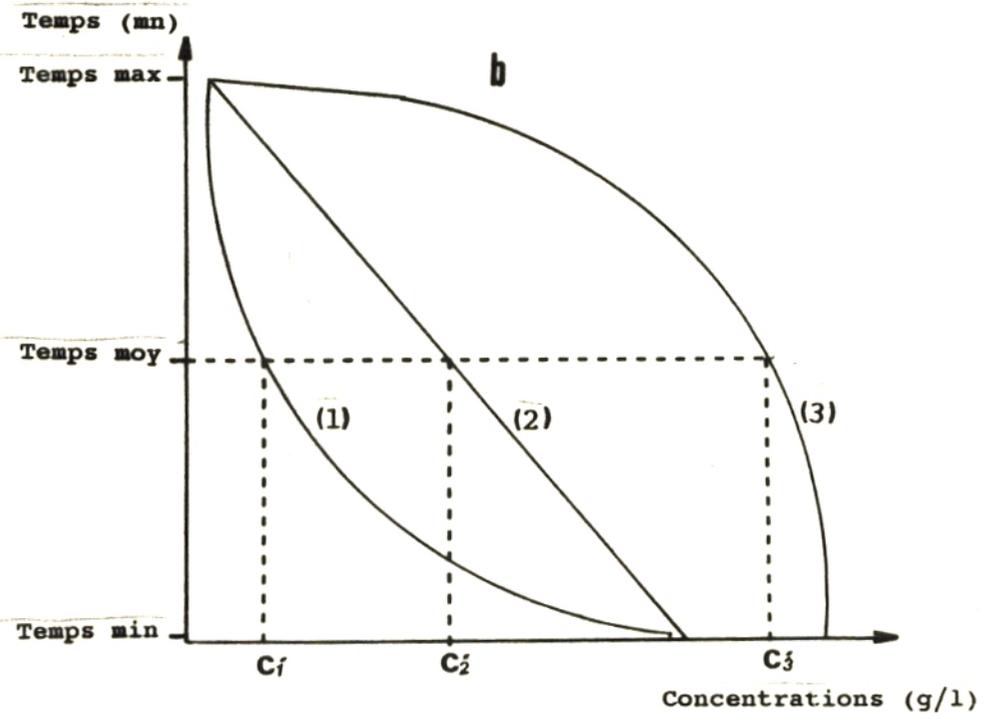
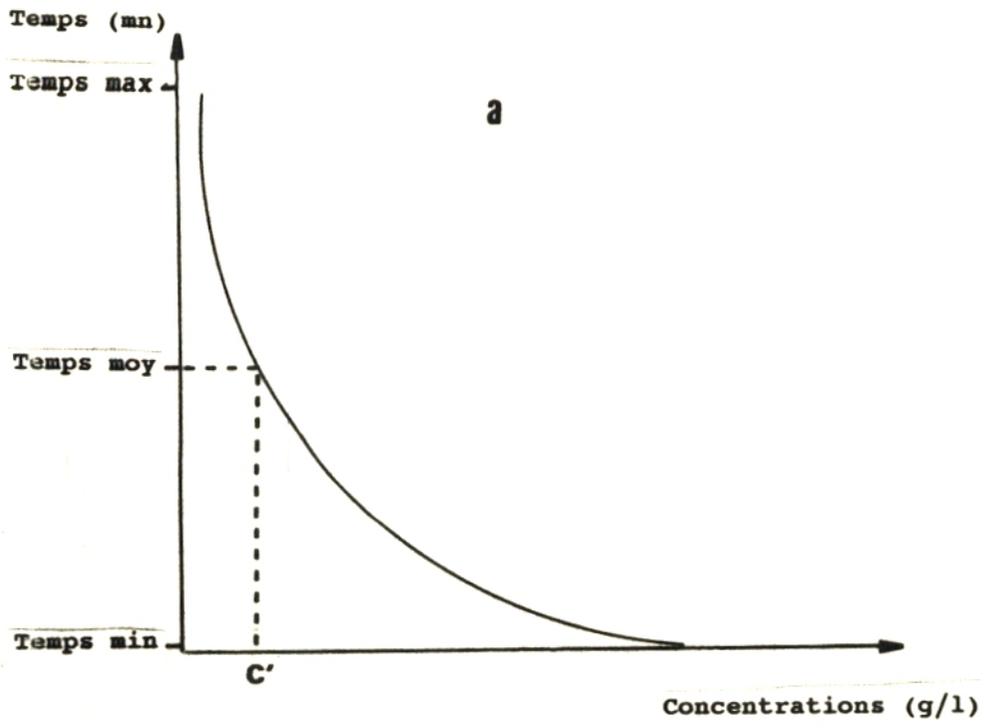


Fig.17 : Détermination de la concentration moyenne.

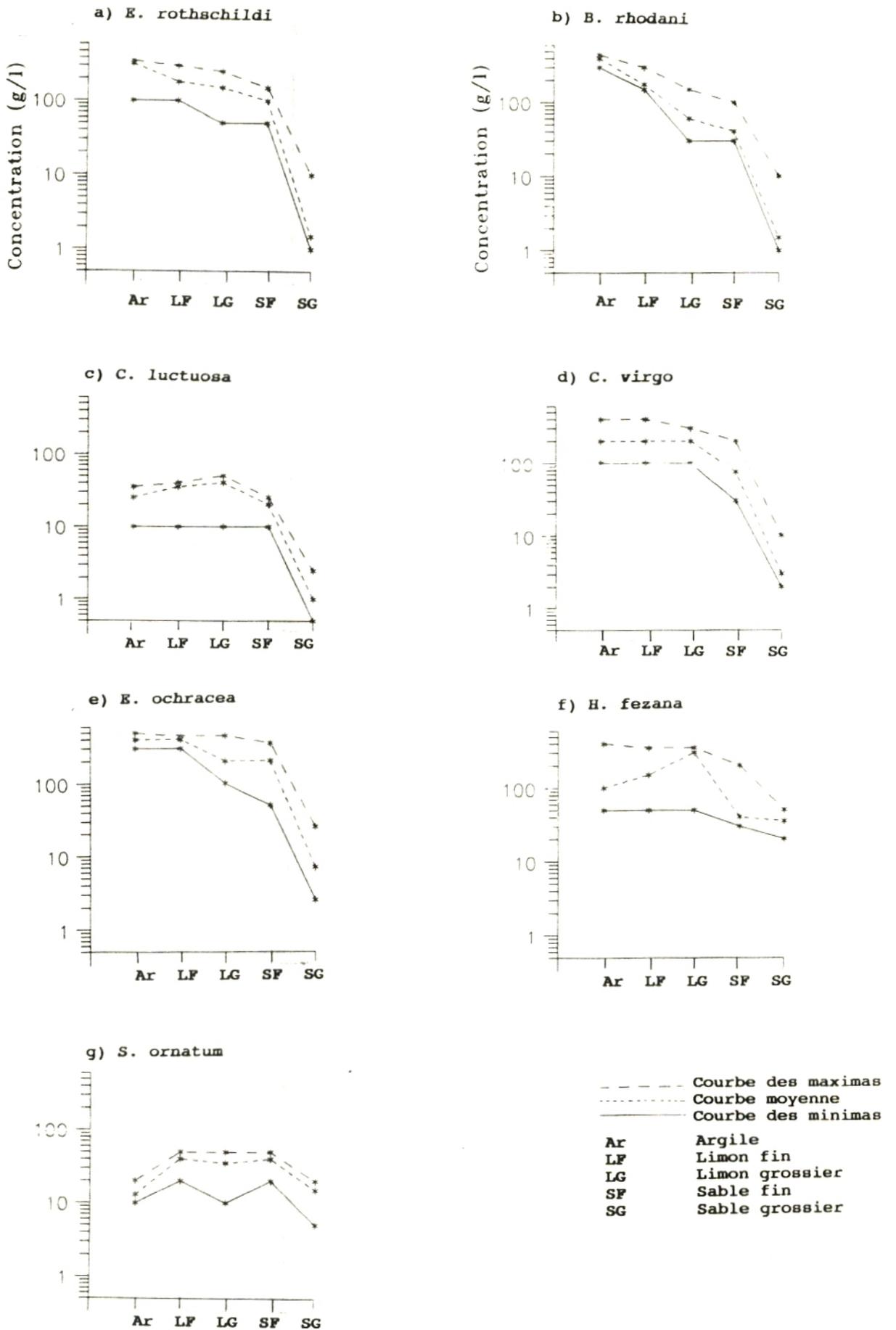


Fig.18. Influence de la granulométrie sur le comportement des espèces

- Celles dont la courbe moyenne est proche de la courbe des concentrations maximales pour les particules fines et qui tend à se rapprocher de la courbe des concentrations minimales, au fur et à mesure, que la granulométrie augmente. Ce sont celles qui réagissent peu, aux fines particules, (argile, limon fin) même à fortes concentrations et qui réagissent plus fortement aux particules grossières (sables), même à faibles concentrations. Il s'agit d'*E. ochracea*, *E. rothschildi*, *C. virgo* et *B. rhodani*. Ce dernier genre d'après Gray et Ward (1982), supporte en effet, des teneurs très élevées d'argile et de limon fin. *Caenis luctuosa* réagit de la même manière, mais pour des concentrations beaucoup plus faibles.

- Celles dont la courbe des concentrations moyennes est proche de celle des concentrations minimales pour les particules fines et les particules grossières et au contraire, se rapproche de la courbe des concentrations maximales pour les particules intermédiaires. Ce sont celles, qui réagissent le plus aux particules fines et également aux particules grossières. Les particules intermédiaires (limon grossier), semblent le moins affecter ces espèces. Il s'agit d'*Hydropsyche fezana* qui supporte des teneurs relativement élevées et de *Simulium ornatum* qui ne supporte que des teneurs faibles. Ces résultats confirment ceux de Nuttall et Bielby (1973) qui avaient relevé, une absence de *Simulium* et d'*Hydropsyche* dans les cours d'eau riches en Kaolinite.

Les particules grossières ont un effet abrasif, tandis que les particules fines entraînent le colmatage des organes respiratoires ou de filtration. La fraction la moins bien tolérée est représentée par les sables. Ceci est confirmé par les expériences réalisées avec le mélange où l'on constate que son effet se rapproche de celui obtenu avec le sable fin. Ce dernier est une cause de perturbation plus sérieuse que les limons (Brusven et Prather, 1974).

5.1.2. Influence des concentrations

La concentration des MES a un effet selon la taille des parti-

cules.

En général, plus la concentration augmente, plus l'effet sur les larves est marqué, ce qui semble logique. Cependant, les teneurs élevées en fines particules ont un effet moins rapide que les faibles teneurs en particules grossières.

On peut dire également que de faibles concentrations en matériaux grossiers ont le même effet sur les larves que de très fortes concentrations en matériaux fins, notamment chez *Simulium ornatum* et *Hydropsyche fezana* (fig.18).

Globalement, on peut estimer que les sables provoquent la même dérive des larves d'insectes que les argiles pour des concentrations de 10 à 100 fois inférieures selon les espèces.

Les espèces qui supportent le mieux les plus grandes quantités de MES, quel que soit la taille des particules sont *E. ochracea*, *E. rothschildi* et *H. fezana*. Celles qui ne supportent que des teneurs moins importantes sont *S. ornatum* et *C. luctuosa*.

Si, d'après la littérature revue par Rosenberg et Snow (1975), la teneur en MES maximale compatible avec la protection de la vie aquatique est de 80mg/l, nous constatons que cette concentration est toujours largement dépassée dans les oueds algériens et méditerranéens. En effet, si l'on compare les concentrations utilisées dans notre expérimentation et qui correspondent aux concentrations de hautes eaux (Yadi, 1991) et de crues (Medinger, 1960), dans les oueds algériens, avec celles testées sur les benthos dans des rivières naturelles, dans la littérature (Pearson et Franklin, 1968; Gammon, 1970; Rosenberg et Wiens, 1975; 1978a; 1978b; White et Gammon, 1977), on voit qu'il y a un écart très important car ces dernières sont nettement plus faibles de l'ordre des mg. Cependant, nos résultats vont dans le même sens que les leurs, du fait que la durée d'exposition dans notre expérimentation est courte (45mn). On peut alors se demander, si la bonne résistance aux faibles teneurs en MES de nos expériences n'est pas liée à un temps d'exposition trop court. En effet, il a été démontré chez la faune benthique que les faibles teneurs ont une influence significative si on prolonge le temps d'exposition : le pourcentage de macroinvertébrés dérivant, augmente d'un nombre non

significatif en 15mn à 50% en 7h d'expérimentation avec une concentration de 100mg/l (Rosenberg et Wiens, 1975; 1978a; Rosenberg et Snow, 1975; Culp et al, 1986).

5.1.3. Influence de la vitesse

Excepté aux vitesses lentes pour lesquelles le transport des grosses particules est impossible (dépôt), on constate que les organismes réagissent significativement à l'augmentation de la vitesse et des concentrations en particules grossières.

L'augmentation de la vitesse en présence de particules fines n'entraîne pas d'effet significatif même aux fortes concentrations sauf chez *E. rothschildi*. Cependant, la figure 19 montrant la réponse des organismes aux variations de la taille des particules et de la vitesse à des concentrations supportées et donc inférieures à celles provoquant le décrochage immédiat de chacune des espèces, permet d'opposer deux types de réaction.

Remarque :

sur la figure 19, le sable grossier n'a pas été représenté en raison de son impact trop important et du fait qu'il ne permet pas l'utilisation des vitesses lentes.

Globalement, si l'on compare ces courbes avec celle du témoin (fig.5), la vitesse a plus d'influence en présence d'argile, sur le comportement de *Simulium ornatum* et dans une moindre mesure d'*Hdropsyche fezana*. Aux faibles vitesses, l'argile gêne en particulier *S. ornatum*.

Pour les autres espèces, la vitesse a un maximum d'influence en présence de matériaux grossiers, en particulier les sables. En fonction des vitesses maximales supportées en présence de MES, on peut distinguer plusieurs groupes :

- *S. ornatum* résiste le mieux au facteur vitesse quel que soit la taille des particules.
- *H. fezana* résiste bien à l'augmentation du courant sauf en présence de particules grossières.

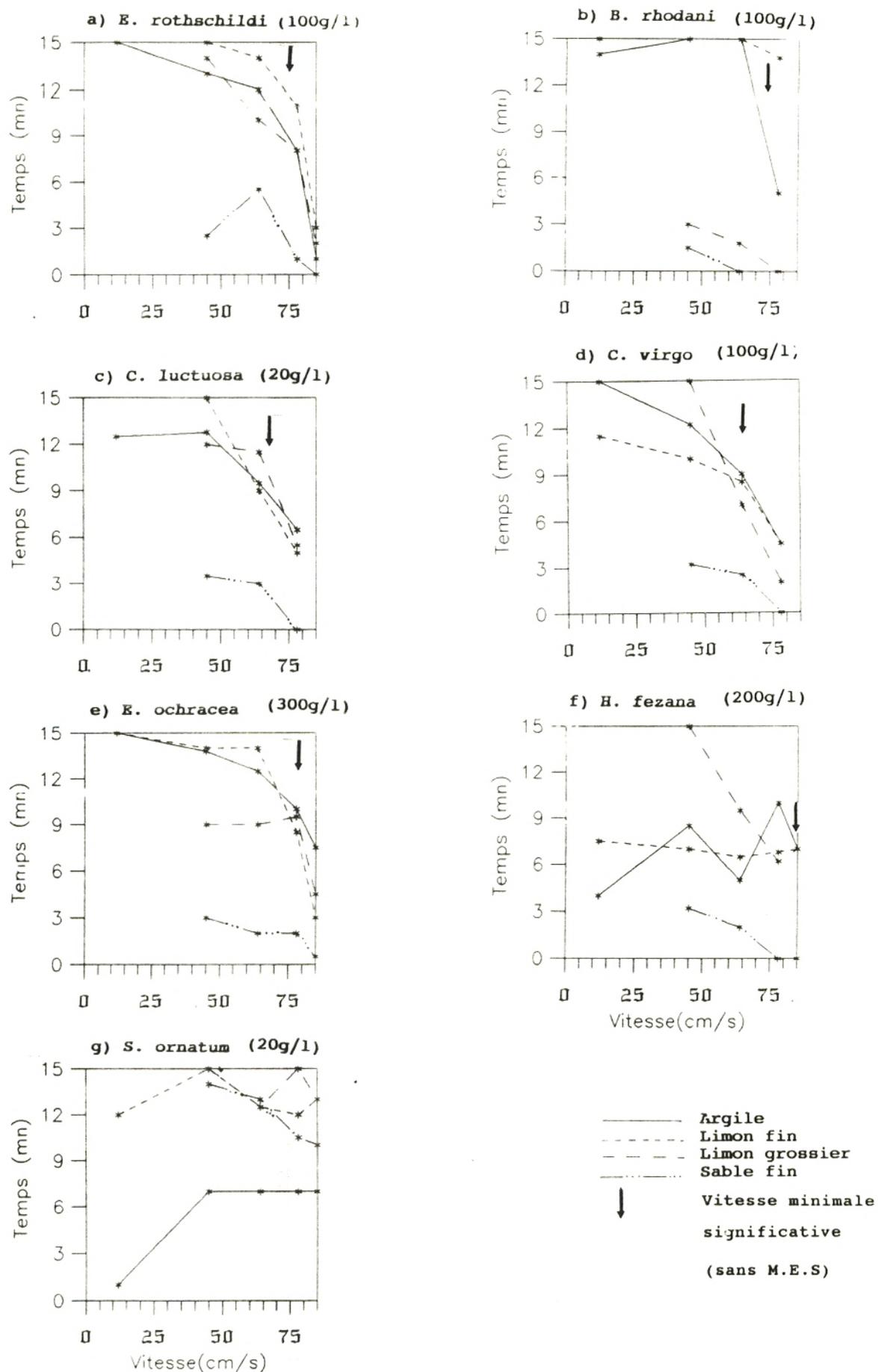


Fig.19. Réponses des invertébrés aux variations de la taille des particules et de la vitesse

- *E. rothschildi* et *E. ochracea* sont sensibles aux vitesses élevées, en présence de MES.

- *B. rhodani*, *C. luctuosa* et *C. virgo* sont les espèces qui résistent le moins aux vitesses élevées en présence de MES, surtout grossières. En comparant nos résultats à ceux de Nuttall (1972) et Nuttall et Bielby (1973), il apparaît clairement que le facteur vitesse en présence de MES est le paramètre prépondérant concernant la dérive des larves de *B. rhodani*, car ces auteurs ont noté un accroissement de la densité de dérive des larves dans des ruisseaux "pollués" par des rejets de Kaolinite (argile très fine) ou de sables.

5.2. Les facteurs propres à l'espèce

5.2.1. Influence de la taille des larves

On observe une meilleure résistance globale aux MES des larves de grande taille, excepté pour *C. virgo*. Cela concerne les larves d'*E. ochracea*, *H. fezana* et *E. rothschildi*. A l'opposé, les larves de *B. rhodani* et de façon plus marquée, les larves de *C. luctuosa* et *S. ornatum* supportent mal les MES.

Cette différence de résistance au niveau des larves est à mettre en relation avec le rapport taille des particules / taille des larves. Par exemple; les grandes larves d'*Eoperla* supportent jusqu'à 20g/l de sables grossiers, tandis que les petites larves de *Caenis* ne supportent que 5g/l de ces particules. C'est pour cette même raison que l'argile exerce moins d'influence sur les organismes à cause de la faiblesse du rapport. Brusven et Prather (1984) ont noté que les stades jeunes de *Calineuria californica* (Plécoptère), en présence de MES pendant 14 jours, présentaient une mortalité supérieure et plus rapide à celle des stades plus âgés.

5.2.2. Influence de la morphologie

La sensibilité aux MES varie en fonction de la morphologie des espèces, en particulier la forme générale du corps, le degré

de sclérification, les systèmes d'accrochage, la forme et la disposition des branchies.

- Les formes grêles, observées chez *Baetis* et *Calopteryx*, présentent une moindre résistance à l'effet combiné des MES et du courant. Par contre, les formes trapues (*Hydropsyche*) offrent une meilleure résistance. Chez ces dernières, la surface exposée au courant est réduite et les animaux offrent ainsi moins de prise à l'impact des particules.

- Les espèces ayant des téguments bien sclérifiés (*E. ochracea*, thorax d'*Hydropsyche*) résistent bien à l'action abrasive des particules grossières. La sclérification étant moindre chez les petites formes de ces groupes et chez les jeunes stades, il est difficile de savoir si les réponses des animaux sont dues à leur taille ou à leur téguments plus fins. Ceci semble confirmer par l'absence d'effet des MES observée par White et Gammon (1977) sur les larves et adultes de *Stenlenis sexlineata* (coleoptère) et qui sont de très petites tailles.

- Les animaux qui présentent les systèmes d'accrochage les plus performants résistent bien aux MES.

Chez *Eoperla*, la robustesse des pattes et des griffes explique la bonne résistance de l'espèce.

Chez *Hydropsyche*, à la puissance des griffes des pattes et des pygopodes, s'ajoute le fait que l'animal secrète des fils qui adhèrent au substrat et qui permettent à la larve d'augmenter ses possibilités d'accrochage.

S.ornatum résiste bien au courant mais son système d'accrochage (couronne de crochets postérieure et sécrétion de fils de soie) devient inefficace en présence de MES. En effet, les simulies sont incapables de se maintenir sur un substrat recouvert d'argile (Nuttall et Bielby, 1973) de limon (Wu, 1931) ou de sable (Nuttall, 1972).

On peut noter que les pattes de *Caenis* et d'*Ecdyonurus* sont arrachées facilement par le courant et par les particules grossières.

- La forme en touffes des branchies chez *Eoperla*, *Hydropsyche*

et dans une moindre mesure *Ecdyonurus* entraîne un colmatage par les particules fines qui asphixie l'animal. Ce colmatage a déjà été observé chez le poisson à concentrations élevées (Ellis, 1937; Wallen, 1951; Herbert et al 1960; Cordone et Pennoyer, 1960; Nuttall et Bielby, 1973; Bruton, 1985), chez les moules (Ellis, 1936, 1944) ainsi que chez les invertébrés (Neveu, 1980). A l'opposé, ces branchies sont moins affectées par les particules grossières en raison de leur position ventrale qui les protège de l'abrasion.

Chez *Caenis*, l'animal relève les plaques branchiales dans le courant, ce qui entraîne, une accumulation des particules fines au niveau des branchies provoquant la mort des larves.

- Les branchies lamellaires chez *Baetis*, de part leur exposition au courant, sont plus facilement arrachées ou abrasées en présence de particules grossières, même aux faibles teneurs. En effet, d'après Lalancette (1984), les branchies de poissons sont irritées lorsqu'une eau contient plus de 10g/l de MES. Cette irritation faciliterait les attaques des agents pathogènes (Van Oosten, 1942).

5.2.3. Ecologie

L'influence des MES dépend aussi de l'écologie de l'espèce. Chaque espèce présente des adaptations morphologiques, physiologiques et éthologiques à son milieu de vie.

En fonction du degré de rhéophilie, on peut distinguer deux groupes :

- Les moins rhéophiles qui résistent de moins en moins aux MES lorsque la vitesse augmente. Ce sont *Calopteryx virgo* qui vit dans les herbiers près des rives, *Baetis rhodani* qui s'abrite derrière les pierres et *Caenis luctuosa* qui affectionne plus particulièrement les courants lents.

- Les rhéophiles, à l'opposé, qui résistent bien aux MES sauf aux concentrations élevées et aux particules grossières. Il s'agit d'*Eoperla*, d'*Hydropsyche*, d'*Ecdyonurus* et de *Simulium*.

En fonction du mode de vie : On observe qu'*Hydropsyche fezana* et *Simulium ornatum*, étant des animaux rhéophiles et filtreurs sont sensibles aux fines particules, aux vitesses faibles, car le système de filtration (le filet chez *Hydropsyche* et les pièces buccales plus filtre chez *Simulium*), est colmaté aux faibles vitesses, en présence d'argile. Ce qui provoque, une gêne et entraîne le décrochage.

Les mêmes constatations ont été faites par Nuttall et Bielby (1973) concernant l'effet détériorant d'un dépôt d'argile sur le mécanisme de filtration chez *Hydropsyche instabilis*.

Caenis luctuosa étant un animal fouisseur, généralement décrit comme un genre qui vit dans les eaux calmes contenant beaucoup de limons et de débris organique (Needham et al, 1935; Leonard, 1962), présente cependant une grande sensibilité aux MES qui doit être attribuée à l'action prépondérante du courant. White et Gammon (1977) notent que les larves de *Caenis* sont plus nombreuses dans un cours d'eau pollué par les sédiments. Ceci s'explique probablement par leur caractère d'animaux fouisseurs. En effet, ces animaux étant de petite taille peuvent donc s'enfoncer dans le substrat dès l'arrivée des sédiments (Rosenberg et Wiens, 1978a; Culp et al, 1986) ce qui explique par conséquent, leur sensibilité dans notre expérimentation vu qu'on n'a pas utilisé un substrat répondant à leur caractère de fouisseur. Mais il faut aussi noter que les concentrations mesurées par ces auteurs ne dépassent pas 300mg/l pour un courant assez faible, donc ne gênant pas ces organismes d'eau lente.

Conclusion

Cette étude, des limites de tolérance aux MES des espèces benthiques représentatives de notre réseau hydrographique (Tafna), utilisant un dispositif d'eau courante très simple, voire primitif, mais très pratique, nous a permis de mettre en évidence des seuils de sensibilité variables selon les espèces, le type de MES, la vitesse et la concentration des MES.

Nous avons limité notre étude aux conditions extrêmes rencontrées dans nos oueds et correspondant aux concentrations en MES mesurées dans nos cours d'eau lors des hautes eaux et des crues.

Ainsi, globalement, les espèces testées montrent une réaction de dérive lorsqu'elles sont exposées aux MES. Les espèces qui supportent le mieux les plus grandes teneurs quel que soit la taille des particules, sont par ordre de sensibilité croissante: *Eoperla ochracea*, *Hydropsyche fezana*, *Ecdyonurus rothschildi*, *Calopteryx virgo* et *Baetis rhodani*. Celles qui ne supportent que des teneurs faibles sont *Simulium ornatum* et *Caenis luctuosa*. Cependant, cette sensibilité varie avec la taille des particules. Les espèces présentent une plus grande dérive entre 100 et 400g/l pour les particules fines (sauf chez *Caenis* et *Simulium* où les seuils varient de 7 à 30g/l) et entre 1 à 30g/l pour les particules grossières (sables). Au sable grossier, toutes les espèces réagissent très fortement car pour des concentrations relativement faibles (500mg/l-10g/l), il a suffi d'un temps très court (1 à 2 mn) pour que leurs effets se fassent ressentir.

D'autre part, en fonction de la variation du courant, nous avons pu noter deux types de dommages :

1. Blessures de pattes et plaques branchiales chez par exemple *Caenis* et des lamelles branchiales chez *Baetis* et *Ecdyonurus* par effet abrasif.
2. Colmatage des organes respiratoires et de filtration chez les filtreurs (*Simulium* et *Hydropsyche*) entraînant parfois la

mort de l'animal.

L'emploi de l'expérimentation au laboratoire, est donc apparue comme la plus facile pour confirmer certaines hypothèses, dont celle de l'influence que peuvent avoir les MES sur la répartition particulière de la faune benthique dans nos réseaux et qui avaient été avancées au cours du déroulement des recherches sur la distribution des organismes aquatiques (Gagneur et al, 1985; Gagneur et Thomas, 1985; 1988; Gagneur et Aliane, 1991).

En effet, dans le bassin versant de la Tafna, il apparaît que la zone amont qui présente des teneurs faibles en MES (Yadi, 1991), abrite actuellement la majorité des espèces constituant la faune benthique (Gagneur, 1987). Celles de l'aval, afin d'échapper aux conditions mauvaises qui y règnent (Giudicelli et al, 1985; Gagneur et Yadi, (sous presse)) notamment les MES, ont une tendance à remonter ou à réduire leur distribution dans la zone des sources et de l'épirithral.

Simulium ornatum, citée comme espèce de plaine, ne se localise effectivement qu'au niveau des sources. Son absence dans les parties aval des cours d'eau peut être liée, en partie, aux teneurs élevées des MES relevées pendant les hautes eaux (jusqu'à 16g/l dont 5g/l de particules grossières). Ces teneurs constituent un seuil qui affecte significativement cette espèce.

De même, *Ecdyonurus rothschildi* remonte vers l'amont pour rechercher les eaux non seulement peu eutrophes (Yadi, 1991), mais probablement des eaux moins chargées en MES puisque des concentrations supérieures au seuil de sensibilité significatif pour cette espèce (30g/l) sont atteintes lors des crues à l'aval.

Contrairement, pour *Eoperla ochracea* qui est une espèce plus résistante aux MES, sa disparition de l'aval est à mettre plutôt en relation avec l'eutrophisation plus marquée de l'eau. Parmi les espèces de l'amont, *B. rhodani*, *C. virgo* et *H. fezana* sont sensibles aux MES et plus particulièrement aux particules grossières. Ceci est en accord avec les conditions qui règnent à l'amont (turbidité faible : inférieure à 200mg/l).

Quant à *Caenis luctuosa*, elle occupe actuellement des milieux variés (Gagneur et Thomas, 1988), malgré la grande sensibilité aux MES révélée par notre étude. Ceci peut s'expliquer par son caractère fouisseur qui lui permettrait de se protéger à l'arrivée des MES dans un cours d'eau lors des petits crues ou de trouver refuge dans des endroits abrités du courant lors des grandes crues (derrières ou sous les blocs).

L'étude des MES s'est donc révélée valable pour élucider certains problèmes concernant la répartition du benthos, bien qu'elle ait été conduite dans un contexte simple. Ceci n'exclut pas qu'on puisse avoir dans d'autres conditions expérimentales, des seuils de sensibilité beaucoup plus faibles, correspondants aux teneurs souvent existantes dans nos cours d'eau. Pour cela, le domaine de recherche doit être élargi en envisageant des concentrations moins fortes de MES pour un temps d'exposition plus long. Ceci mérite un perfectionnement technique complémentaire avec installation par exemple; de deux pompes qui peuvent se relayer.

L'utilisation des fortes teneurs dans ce travail, peut donc constituer un moyen d'estimation de la sensibilité de la faune benthique, au moment des crues ou lors d'extraction de matériaux.

Nous avons estimé que dans le fonctionnement des oueds, il semble que ce soit les concentrations extrêmes qui influent fortement. Par contre, les concentrations faibles, même de durée prolongée affectent peu la faune, qui est déjà une faune adaptée.

BIBLIOGRAPHIE

- AGUESSE P., 1968.** Les odonates de l'Europe occidentale, du nord de l'Afrique et des îles atlantiques.
Masson eds. Paris : 258p.
- AGUILAR J.D., DOMMANGET J.L., et PRECHAC R., 1985.** Guide de Libellules d'Europe et d'Afrique.
Ed. Neuchâtel : 341p.
- AMBÜHL V.H., 1959.** Die Bedeutung der strömung als Ökologischer Faktor.
Schweiz. Z. Hydrol. 21 : 134-263.
- AUBERT J., 1956.** Contribution à l'étude des plécoptères d'Afrique du Nord.
Mitt. Schweiz. Ent. Ges., 29 : 419-436.
- AUBERT J., 1961.** Contribution à l'étude des plécoptères du Maroc.
Mitt. Schweiz. Ent. Ges., 33 : 213-222.
- BADRI A., GIUDICELLI J., et PREVOT G., 1987.** Effet d'une crue sur la communauté d'invertébrés benthiques d'une rivière méditerranéenne, le Rdat (Maroc).
Acta oecologica. Gener., 8 (4) : 481-500.
- BERTHELEMY C., 1973.** Données préliminaires sur les plécoptères de Tunisie.
Verh. Internat. Verein. Limnol., 18 : 1544-1548.
- BJORN T.C., BRUSVEN M.A., MOLNAV M.P., MILLIGAN J.H., KLAMT R.A., CHACHO E. et SCHAYE C., 1977.** Transport of granitic sediment in streams and its effects of insects and fish.
Idaho For. Wildl. Range Exp. Stn. Bull., 17 : 43p.
- BOU C., 1977.** Conséquences écologiques de l'extraction des alluvions récentes dans le cours moyen du Tarn.
Bull. Ecol., 8 (4) : 435-444.

- BOUCHAUD B. et CLAVEL P., 1978.** Les exploitations de granulats d'alluvions et les aménagements de cours d'eau dans l'écosystème aquatique. Leurs incidences sur le périphyton et la production primaire dans le cours inférieur de la Dore. Bilan 1974-1978 sur la Loire, Allier, Dore.
Rapport. Labo. Zoo. Hydrob. Rég. Université Clermont II : 213p.
- BOUMAIZA M. et THOMAS A.G.B., 1986.** Répartition et écologie des Epheméroptères de Tunisie (1^{ère}) Partie (Insecta, Ephemeroptera).
Archs. Inst. Pasteur Tunis., 63 (4) : 567-599.
- BOURNAUD M., 1963.** Le courant, facteur écologique et éthologique de la vie aquatique.
Hydrobiol., 21 : 125-65.
- BOURNAUD M. et THIBAUT M., 1973.** La dérive des organismes dans les eaux courantes.
Annls. Hydrobiol., 4 : 11-49.
- BRUSVEN M.A., 1973.** A closed system plexiglas stream for studying insect-fish-substrate relationship.
Prog. Fish. Culturist., 35 : 87-89.
- BRUSVEN M.A. et HORNING C.E., 1984.** Effects of suspended and deposited volcanic ash on survival and behaviour of stream insects.
J. Kansas entomol. Soc., 57 (1) : 55-62.
- BRUSVEN M.A. et PRATHER K.V., 1974.** Influence of stream sediments on distribution of macrobenthos.
J. Entomol. Soc. Brit. Columbia., 71 (1) : 25-32.
- BRUTON M.N., 1985.** The effect of suspensoïds on fish.
Hydrobiologia., 125 : 221-241.
- CIBOROWSKI J.J.H., 1976.** A study of the drift behaviour of the mayfly *Ephemerella subvaria* Mc Dunnough.
M.S.C. Thesis. University of Toronto : 136p.

- CIBOROWSKI J.J.H., POINTING P.J. et CORKUM L.D., 1977.** The effect of current velocity and sediment on the drift of the mayfly *Ephemera subvaria* Mc Dunnough.
Freshwater biology, 7 : 567-572.
- CLAVEL P., CUINAT R., HAMON Y. et ROMANEIX C., 1977.** Effets des extractions de matériaux alluvionnaires sur l'environnement aquatique dans les cours supérieurs de la Loire et de l'allier.
Thèse 3^e Cycle, VER. SC. Clermont Fr et Ingéniorat ESITPA, Le Vaudreuil conseil supérieur de la pêche (6^e D.R) : 186p.
- CLAVEL P., CUINAT R., HAMON Y. et ROMANEIX C., 1978.** Effets des extractions de matériaux alluvionnaires sur l'environnement aquatique dans les cours supérieurs de la Loire et de l'Allier.
Bull. Fr. Piscic., 268 : 123-154.
- CORDONE A.J. et KELLEY D.W., 1961.** The influence of inorganic sediment on the aquatic life of streams.
Calif. Fish. Game, 47 : 189-228.
- CORDONE A.J. et PENNOYER S., 1960.** Notes on silt pollution in the Trucker River drainage.
Calif. Dept. Fish and Game. Inland Fisheries. Admin. Rept., 60 (14) : 25p.
- CORKUM L.D., 1976.** A comparative study of behaviour relating to differential drift of two species of mayflies.
Pn.D. Thesis. Univ. Toronto.
- CUINAT R., 1980.** Rejets de matières en suspension par les exploitations de granulats dans la rivière Allier. Effets sur la vie aquatique.
Proc. of the technical consultation on "Allocation of Fishery resources" (Vichy 1980); F.A.O. Rome: 40-46.

- CULP J.M., WRONA F.J., DAVIES R.W., 1986.** Response of stream benthos and drift to fine sediment deposition versus transport.
Can. J. Zool., 64 : 1345-1351.
- CUMMIN K.W. et LAUFF G.H., 1969.** The influence of substrate particle size on the microdistribution of stream macrobenthos.
Hydrobiologia., 34 : 145-181.
- DAGNELIE P., 1970.** Théories et méthodes statistiques.
Les presses agronomiques de Gembloux, A.S.B.L., Vol 2 : 463p.
- DAKKI M., 1978.** Le genre *Hydropsyche* au Maroc. Trichoptera Hydropsychidae.
Bull. Inst. Sc. Rabat., 3 : 111-120.
- DAKKI M., 1979.** Recherches hydrobiologiques sur un cours d'eau du moyen Atlas (Maroc).
Thèse de Doctorat de 3^e Cycle, Aix-Marseille : 126p
- DAKKI M., 1986.** Recherches hydrobiologiques sur le haut sebou (moyen Atlas); une contribution à la connaissance faunistique, écologique et historique des eaux courantes sud-méditerranéennes.
Thèse d'Etat, Aix-Marseille.
- DEMOLON A., 1966.** Principe d'agronomie. 1-Dynamique du sol.
Eds. Dunod, Paris : 520p.
- DORIER A. et VAILLANT F., 1954.** Observations et expériences relatives à la résistance au courant de divers invertébrés aquatiques.
Trav. Lab. Hydrobiol. Grenoble, 45-46 : 9-31.
- EDINGTON J.M., 1968.** Habitat preference in net-spinning caddis larvae with special reference to the influence of water velocity.
J. Anim. Ecol., 37 : 675-692.

- EDWARDS G.A et IRVING L., 1943.** The influence of temperature and season upon the oxygen consumption of the sand crab *Emerita talpoïda* say.
J. Cell. Comp. Physiol., 21 : 169-182.
- EL AGBANI M.A., 1984.** Le réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Bou Regreg (plateau central marocain). Essai de biotypologie.
Thèse 3^e Cycle, Lyon I : 147p.
- ELLIS M.M., 1931.** A survey of conditions affecting fisheries in the upper Mississippi River.
U.S Bureau of fisheries circular 5 : 18p.
- ELLIS M.M., 1936.** Erosion silt as a factor in aquatic environments.
Ecology, 17 (1) : 29-42.
- ELLIS M.M., 1937.** Detection and measurement of stream pollution.
U.S Dept of commerce, Bur, fisheries, Bull., 22 (48) : 365-437.
- ELLIS M.M., 1944.** Water purity standards for fresh-water fishes.
U.S Fish and wildl. Serv., Spec. Sci. Rept., 2 : 18p.
- FAESSEL B., 1985.** Les Trichoptères.
Bull. Fr. Pêche et Pisciculture, 299 : 41p.
- GAGNEUR J., 1987.** Sur la vulnérabilité des écosystèmes aquatiques en Algérie.
T.S.M. L'eau : 209-212.
- GAGNEUR J., 1988.** Etude hydrobiologique du bassin de la Tafna (Algérie). I. Présentation du milieu et premiers résultats.
En préparation.

- GAGNEUR J., (Sous presse).** Flashfloods and drying up as major disturbances upon benthic communities in the North-african wadis.
Communication 25^e Congrès S.I.L, Barcelone 1992,
Verh. int. Ver. Limnol., 25.
- GAGNEUR J. et ALIANE N., 1991.** Contribution à la connaissance des Plécoptères d'Algérie.
X^e Symposium International sur les plécoptères.
Kluwer Acad. Publ. Dordrecht : 311-323.
- GAGNEUR J. et CHAOUI-BOUDGHANE C., 1991.** Sur le rôle du milieu hyporhéique pendant l'assèchement des oueds de l'ouest algérien.
Stygologia, 6 (2) : 77-89.
- GAGNEUR J. et CLERGUE-GAZEAU M., 1988.** Les simuliés d'Algérie (Diptera : Simuliidae).I. Première donnée biogéographique et écologiques sur les espèces de l'ouest algérien.
Annls. Limnol., 24 (3) : 275-284.
- GAGNEUR J. et THOMAS A.G.B., 1985.** Athericidae d'Afrique du nord. III la larve d'*Atrichops numidicus* Thomas et Gagneur, 1981 et son écologie (Diptera, Brachycera).
Bull. Soc. Hist. Nat., Toulouse, 121 Suppl : 125-129.
- GAGNEUR J. et THOMAS A.G.B., 1988.** Contribution à la connaissance des Ephéméroptères d'Algérie. I. Répartition et écologie (1^{ère} partie) (Insecta, Ephemeroptera).
Bull. Soc. Hist. Nat., Toulouse, 124 : 213-223.
- GAGNEUR J. et THOMAS A.G.B. VITTE B., 1985.** Première citation d'une espèce du genre *Paraleptophlebia* en Afrique du nord : *P.cincta* (Retzius, 1783) et son écologie (Ephemeroptera, Leptophlebiidae).
Bull. Soc. Hist. Nat., Toulouse, 121 : 141-143.

- GAGNEUR J. et YADI B., (Sous presse).** Intérêt faunistique du peuplement des sources en Afrique du Nord.
- GAMMON J.R., 1970.** The effect of inorganic sediment on stream biota.
Envir. Prot. Aq. Wat. Poll. Contr. Res. Ser. 18050 DW, (12-70) Washington. D.C 141p.
- GIUDICELLI J. et DAKKI M., 1984.** Les sources du moyen Atlas et du Rif (Maroc) : faunistique (description de deux espèces nouvelles de Trichoptères), écologie, intérêt biogéographique.
Bijdr. Dierk., 54 (1) : 83-100.
- GIUDICELLI J., DAKKI M. et DIA A., 1985.** Caractéristiques abiotiques et hydrobiologiques des eaux courantes méditerranéennes.
Verh. Internat. Verein. Limnol., 22 : 2094-2101.
- GIUDICELLI J., DIA A. et LEGIER P., 1980.** Etude hydrobiologique d'une rivière de région méditerranéenne, l'Argens (Var, France): habitat, hydrochimie, distribution de la faune benthique.
Bijdr. Dierk., 50 (2) : 303-341.
- GRAY J.L. et WARD J.V., 1982.** Effects of sediment releases from a reservoir on stream macroinvertebrates.
Hydrobiologia., 96 : 177-184.
- HAMILTON J.D., 1961.** The effect of sand pits washings on a stream fauna.
Verh. Int. Verein. Theor. Angew. Limnol., 14 : 435-439.
- HART R.C., 1988.** Zooplankton feeding rates in relation to suspended sediment content : Potential influences on community structure in a turbid reservoir
Freshwater Biology., 19 : 123-139.

- HANSMANN E.W. et PHINNEY H.K., 1973.** Effects of logging on periphyton in coastal streams in oregon.
Ecology., 54 : 194-199.
- HERBERT D.W.M., ALABASTER J.S., DART M.C. et LLOYD R., 1961.** The Effect of China-clay wastes on trout streams.
Int. J. Air Wat. Poll., 5 : 56-74.
- HILDEBRAND S.G., 1974.** The relation of drift to benthos density and food level in an artificial stream.
Limnol. Oceanogr., 19 : 951-957.
- HUBAULT E., 1927.** Contribution à l'étude des invertébrés torrenticoles.
Bull. Biol. Suppl., 9 : 388p.
- HYNES H.B.N., 1960.** The biology of polluted waters.
Liverpool, University of Liverpool Press : 202p.
- ILLIES J., 1978.** Plecoptera. In J.ILLIES, Limnofauna Europaea.
Fisher, Verlaq. Stuttgart., : 264-273.
- KOHLER S.L., 1985.** Identification of stream drift mechanisms : an experimental and observational approach.
Ecology., 66 (6) : 1749-1761.
- LALANCETTE L.M., 1984.** Effet du dragage sur les sédiments, le plancton et les poissons, dans la région de Vauvert au Lac St-Jean, Quebec.
Arch. Hydrobiol., 99 (4) : 463-477.
- LENAT D.R., PENROSE D.L. et EAGLESON K.W., 1981.** Variable effects of sediment addition on stream benthos.
Hydrobiologia., 79 : 187-194.
- LEONARD J.W., 1962.** Environmental requirements of Ephemeroptera pp110-117 in : TARZWELL C.M. (ed).
Third seminar in biological problems in water pollution. U.S. P.H.S. Publ., 999 - WP-25 : 424p.
- LESTAGE J.A., 1925.** Ephéméroptères, Plécoptères et Trichoptères recueillis en Algérie par M.H. GAUTHIER et liste

des espèces connues actuellement de l'Afrique du nord.

Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. N., 16 : 8-18.

LUEDTKE R.L. et BRUSVEN M.A., 1976. Effects of sand sedimentation on colonization of stream insects.

J. Fish. Res. Board Can., 33 : 1881-1886.

MAGNIN E., 1977. Ecologie des eaux douces du territoire de la baie de James.

Société d'énergie de la baie James : 1-454.

MC CLELLAND W.T. et BRUSVEN M.A., 1980. Effect of sedimentation on the behaviour and distribution of riffle insects in a laboratory stream.

Aquat. Insects., 2 : 161-169.

MC NICOL R.E et SCHERER E., 1985. A system for recording and analyzing macroinvertebrate behaviour in laboratory stream channel.

Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci., 1391 : 15p.

MEBARKI A., 1984. Ressources en eau et aménagement en Algérie. Le bassin du Kebir, Rhumel (Algérie).

Office des publications universitaires : 302 p.

MEDINGER G., 1960. Transport solide des oueds algériens.

Annuaire hydrologique de l'Algérie 1958-59. Direction de l'Hydraulique et de l'équipement rural de l'Algérie. Alger : 5-31.

MOHATI A., 1985. Recherches hydrobiologiques sur un cours d'eau du haut Atlas de Marrakech (Maroc). L'oued Ourika: écologie, biotypologie et impact des activités humaines sur la qualité des eaux.

Doctorat de Spécialité, Univ. Marrakech : 180p.

NEEDHAM J.G., TRAVER J.R., HSU Y.C., 1935. The biology of mayflies.

Comstock Publ. Co, Ithaca, N.Y : 759p.

- NEVEU A., 1980.** Influence d'une fine sédimentation dans un canal expérimental sur la densité du macrobenthos, sa composition et sa consommation par des Salmonides
Bull. FR. Pesci., 276 : 104-122.
- NUTTALL P.M., 1972.** The effects of sand deposition upon the macroinvertebrates fauna of the river camel.
Cornwall.
Fresh water Biol., 2 : 181-186.
- NUTAL P.M. et BIELBY G.H., 1973.** The effects of China clay wastes on stream invertebrates.
Environ. Pollut., 5 : 77-86.
- O'HOP J. et WALLACE J.B., 1983.** Invertebrate drift, discharge and sediment relations in a southern appalachian headwater stream.
Hydrobiologia., 98 : 71-84.
- PATTEE E., 1962.** Méthodes de mesure du métabolisme respiratoire chez les animaux aquatiques.
Hydrobiologia., 19 : 40-56.
- PEARSON W.D. et FRANKLIN D.R., 1968.** Some factors affecting drift rates of *Baetis* and Simuliidae in a large river.
Ecology., 49 : 75-81.
- PHILIPSON G.N., 1954.** The effect of water flow and oxygen concentration on six species of caddisfly (Trichoptère) larvae.
Proc. Zool. Soc. Lond., 124 : 547-564.
- RITCHIE J.C., 1972.** Sediment fish and fish habitat.
J. Soil. Wat. Conserv., 27 : 124p.
- ROBARDS R.D., 1979.** Underwater light penetration. Chlorophyll a and primary production in a tropical african lake (Lake Mc llwaine, Rhodesia).
Archiv für Hydrobiologie., 86 : 423-444.

- ROBARDS R.D., 1984.** Factor controlling primary production in a hypertrophic lake (Hartbeespoort Dam, south africa).
Journal of plankton research, 6 : 91-105.
- ROSENBERG D.M. et SNOW N.B., 1975.** Ecological studies of aquatic organisms in the Mackenzie and porcupine river drainages in relation to sedimentation.
Tech. Rep. Fish. Mar. Serv. (Can)., 547 : 86p.
- ROSENBERG D.M et WIENS A.P., 1975.** Experimental sediment addition studies on the Harris river, N.W.T., Canada : The effect on macroinvertebrate drift.
Verh. Int. Verein. Limnol., 19 : 1568-1574.
- ROSENBERG D.M et WIENS A.P., 1978a.** Effects of sediment addition on macrobenthic invertebrates in a northern canadian river.
Water Res., 12 : 753-763.
- ROSENBERG D.M et WIENS A.P., 1978b.** Responses of Chironomidae (Diptera) to Short-Term Experimental sediment additions in the Harris river, Northwest Territories, Canada.
Acta Universitatis Carolinae Biologica, 18 : 181-192.
- SCULLION J. et EDWARDS R., 1980.** The effects of coal industry pollutants on the macroinvertebrate fauna of a small river in the south wales coalfield.
Fresh water Biol., 10 : 141-162.
- SOLDAN T. et GAGNEUR J., 1985.** *Ecdyonurus rothschildi* Navas, 1929 : description de la larve (Ephemeroptera, Heptageniidae).
Annls. Limnol., 21 (2) : 141-144.
- SURBER E.W., 1953.** Biological effects of pollution in Michigan waters.
Sewage ind. Waste Enqng., 25 : 79-86.

- TEBO L.B., 1955.** Effects of siltation resulting from improper logging in the bottom fauna of a small trout stream in the southern Appalachians.
Prog. Fish. Cuit., 17 : 64-70.
- TROUBAT J.J., 1981.** Dispositif à gouttières multiples destiné à tester in situ la toxicité des insecticides vis-à-vis des invertébrés benthiques.
Rev. Hydrobiol. Trop., 14 (2) : 149-152.
- VAILLANT F., 1955.** Recherche sur la faune macricole de France, de Corse et d'Afrique du nord.
Thèse 3^e Cycle, Université de Paris : 252p.
- VALLA M., KOZAKI J. et DRBAL J., 1980.** Cuicent Pudoz Nalstut, II
SPN PVAHA : 280p.
- VAN OOSTEN J., 1948.** Turbidity as a factor in the decline of great lakes fishes with reference to lake.
Erie. Trans. Amer. Fish. Soc., 75 : 281-322.
- WALLEN I.E., 1951.** The direct effect of turbidity on fishes.
Oklahoma Agr. Mech. College. Bull., 48 : 1-27.
- WALTON O.E., REICE S.R. et ANDREWS R.W., 1977.** The effects of density, sediment particle size and velocity on drift of *Acroneuria abnormis* (Plecoptera).
Oikos, 28 : 291-298.
- WAUTIER J. et PATTEE E., 1955.** Expérience physiologique et expérience écologique. L'influence du substrat sur la consommation d'oxygène chez les larves d'Ephéméroptères.
Bull. Mers. Soc. Linn. Lyon, 24 : 178-183.
- WHITE D.S. et GAMMON J.R., 1977.** The effect of suspended solids on macroinvertebrate drift in an Indian Creek.
Proceeding of the Indiana Academy of Science, 86: 182-188.

- WU Y.F., 1931.** A contribution to the biology of *Simulium*.
Pap. Mich. Acad. Sci., 13 : 543-599.
- YADI B., 1991.** Nature et évolution de la matière minérale et organique dans le bassin de la Tafna (N-W algérien).
Thèse de Magister, Université Tlemcen : 131p.
- ZAHNER R., 1959.** Die Bindung der *Calopteryx* Arten an das strömende wasser.
Internationale revue DER Gesanrten Hydrobiologie.,
Band 44, Heft 1 : 51-130.